ROYAUME DU MAROC

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

LES CAHIERS DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

12

SOUS-DIRECTION DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
ET DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE
99, Avenue de Témara

RABAT - 1961

ROYAUME DU MAROC

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

LES CAHIERS DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

12

SOUS-DIRECTION DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
ET DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE
99, Avenue de Témara

RABAT - 1961

TABLE DES MATIERES

CONTRIBUTION A L'ETUDE DU pH DES SOLS
LOI DE VARIATION DU PH EN FONCTION DE LA DILUTION
SES CONSEQUENCES

PREFACE

La notion du pH des sols prend de nos jours aux yeux du chimiste agronome une importance de plus en plus grande. Son influence, néfaste ou bénéfique selon les sols et les cultures, a fait l'objet de maintes expériences et n'est plus à démontrer. Mais si le problème de sa mesure fut abordé par différents auteurs, il n'en demeure pas moins que nous pouvons nous demander jusqu'à quel point nous sommes dans le vrai en affirmant que le pH de tel sol est de telle valeur.

L'objet de cette étude est de démontrer la contingence d'une pareille assertion. Elle n'a pas la prétention d'ériger des règles à suivre en matière de mesure du pH des sols, mais tend simplement à montrer les difficultés que trouvera l'expérimentateur pour déterminer le pH vrai d'un sol.

Elle montre également et surtout la nécessité d'une normalisation des méthodes dans ce domaine (rapport excipient/sol — nature de l'excipient — finesse du sol — traitement préalable de l'échantillon, etc.). La comparaison des résultats et, par suite, les conclusions que l'on peut en tirer sont en effet sans fondement si les méthodes qui leur ont donné naissance diffèrent entre elles.

Contrairement à la méthode classique, nous n'avons pas émis une hypothèse pour l'étayer ensuite par l'expérience. Nous avons simplement constaté les faits et essayé de leur donner une interprétation : une suite d'équilibres de Donnan. Ce n'est pas forcément la bonne, mais elle a au

moins le mérite de nous permettre de dégager une formule mathématique qui, traduite sur un graphique, coïncide à peu près avec la courbe expérimentale. Cependant si cette interprétation vaut pour les sols à pH alcalins, le cas des terres dites acides lui échappe complètement ; nous avons essayé d'en donner les raisons.

Qu'il nous soit permis ici de témoigner notre reconnaissance à M. Chambionnat, Chimiste en Chef au Laboratoire Officiel de Chimie, pour les conseils éclairés et l'aide bienveillante qu'il nous a prodigués au cours de cette brève étude.

I — LOI DE VARIATION DU pH AVEC LA DILUTION DE LA SUSPENSION

La mesure du pH suppose l'existence d'une solution. Normalement le pH doit varier avec la concentration de cette suspension.

Lorsque l'on étudie les pH des sols en fonction de la concentration des préparations on constate effectivement une variation ; mais cette variation, si elle est enregistrée dans un intervalle suffisant, laisse apparaître l'existence d'un maximum.

Le phénomène est absolument général et les variations dépassent largement les erreurs expérimentales possibles.

En partant d'une solution à forte concentration (200 g de terre pour 100 cm³ d'eau par exemple), on voit le pH croître assez rapidement avec la dilution, puis la croissance se fait moins rapide, le pH passe par un maximum, puis commence à décroître au fur et à mesure que la dilution continue à croître.

Les trois exemples ci-après donnent une idée de l'importance des variations.

CONCENTRATIONS	TERRE N° 1	TERRE N° 2	TERRE N° 3
200 g/100 cm³	8,06	7.10	5.30
25 g/100 cm³	—	7.40	—
5 g/100 cm³	8.50	—	—
3,5 g/100 cm³	—	—	5.83
0,1 g/100 cm³	6.63	6.18	5.00

L'existence de ces maximum, c'est-à-dire l'anomalie d'une branche croissante de la courbe des pH dès le début de la dilution, avec les sols alcalins par exemple, ne peut s'expliquer par l'influence de l'activité des ions. On pourrait penser en effet, que, la concentration en ions OH diminuant lorsque la dilution croît tandis que le coefficient d'activité (f) de ces ions croît dans le même temps, il existe un domaine à l'intérieur duquel le produit (OH). f (OH) pourrait aller en croissant avec la dilution ; mais il n'en est rien. La force ionique des suspensions de terre, même à 200 g pour 100 cm³ d'eau, reste assez faible et les coefficients d'activité, lorsque l'on passe de la dilution 200 % à 0,1 %, varient entre 0,62 et

0,99 au maximum, alors que la dilution est passée de 1 à 2 000. Les mêmes considérations sont valables dans le cas des terres acides.

Les essais d'interprétation de ce phénomène par les considérations classiques, électrochimiques, d'hydrolyse ou de dissociations en paliers de bases ou acides polyvalents ne permettent pas non plus de donner une explication générale et encore moins de le chiffrer quantitativement.

Il faut donc chercher dans une autre direction et l'on est conduit inévitablement à envisager un mécanisme lié à la présence des colloïdes dans le sol.

Ce facteur paraît d'autant plus vraisemblable que les maximum des pH sont d'autant plus prononcés que la finesse de la terre est plus grande pour un même sol et qu'avec une terre calcinée ou sans colloïde le maximum de pH n'existe plus.

La présence d'un colloïde introduit une dissymétrie dans la distribution des ions. Les colloïdes ont la propriété de retenir les ions fixés à leur surface, les micelles évoluant vers la formation d'ions *non* diffusibles.

Pour chaque dilution il s'établit ainsi un équilibre entre les ions fixés sur le colloïde et les ions diffusibles existant dans la solution.

Il n'est pas possible de donner une explication physico-chimique satisfaisante du phénomène. Mais par contre on peut le schématiser dans son ensemble et considérer que le milieu est soumis à une suite d'équilibres de Donnan. On n'introduit, ce faisant, aucune hypothèse sur la nature des réactions et des forces qui entrent en jeu. On ne fait qu'écrire qu'il y a bien équilibre des charges entre la solution — ions diffusibles — et le colloïde — ions diffusibles + ions non diffusibles (charge de la micelle).

En milieu de pH alcalin (présence d'ions OH^- libres) on schématise l'équilibre de Donnan de la façon suivante :

COLLOIDE	SOLUTION
Z ions non diffusibles $(M_i\ OH)^-$	X ions OH^-
Y ions libres OH^-	X ions M^+
(Y + Z) ions M^+	

avec $X \times X = Y\ (Y + Z)$ (équation d'équilibre)
et ceci pour chaque dilution.

Pour appliquer cette notion à l'étude des variations de pH en fonction de la dilution, on procédera de la façon suivante :

1° On déterminera expérimentalement, dans un intervalle suffisamment étendu, les diverses valeurs du pH pour des préparations de terre de plus en plus diluées.

2° On obtiendra ainsi pour une dilution D_0 origine, prise comme référence, un pH expérimental qui permettra de calculer la concentration en ions OH^- correspondante, soit X_0 de la formule de Donnan.
Pour cette solution d'origine, prise au maximum de concentration, on posera arbitrairement $Z_0 = 0$, ce qui conduit à $X^2_0 = Y^2_0$.

3° La dilution croissant, pour chaque valeur D_i de cette dilution, on a théoriquement :

$$Y_i = \frac{X_0}{\frac{D_i}{D_0}} \quad \text{et} \quad X_i = 10^{(pH_i - 14)}$$

La relation de Donnan exige donc :

$$\text{Concentration en ions } OH^- \text{ expérimentale} \quad X_i = \sqrt{\frac{X_0}{\frac{D_i}{D_0}} \times \left(\frac{X_0}{\frac{D_i}{D_0}} + Z_i \right)}$$

d'où l'on tire :

$$Z_i = \frac{[X_i]^2 - \left[\frac{X_0}{\frac{D_i}{D_0}} \right]^2}{\left[\frac{X_0}{\frac{D_i}{D_0}} \right]}$$

Pour chaque dilution D_i, Z_i représentent le nombre d'ions non diffusibles fournis par les micelles au fur et à mesure de la dilution — (avec l'hypothèse $Z_0 = 0$ pour la dilution D_0, toutefois).

4° Si l'on trace la courbe des valeurs de Z_i pour les différentes valeurs de $\frac{D_i}{D_o}$ on s'aperçoit qu'elle peut être exprimée avec une précision satisfaisante par une relation du type :

$$Z = e^{-\theta\left[\left(\text{Log}\frac{D_i}{D_o}\right)^2 + p\left(\text{Log}\frac{D_i}{D_o}\right) + q\right]} \qquad (1)$$

dans laquelle θ, p et q sont des constantes indépendantes de la dilution.

(Log de Z est une fonction du second degré du logarithme de la dilution)

en posant : $-\theta\left[\left(\text{Log}\frac{D_i}{D_o}\right)^2 + p\left(\text{Log}\frac{D_i}{D_o}\right) + q\right] = \sigma$

il vient : $Z_i = e^{\sigma_i}$

d'où :

$$\text{pH à la dilution } D_i = 14 + \log_{10}\sqrt{\left[\frac{X_o}{\frac{D_i}{D_o}}\right]\left[\frac{X_o}{\frac{D_i}{D_o}} + e^{\sigma_i}\right]} \qquad (2)$$

Z_i passe par un maximum pour une valeur de la dilution telle que :

$$\log_{10}\left(\frac{D_i}{D_o}\right) = -\frac{p}{2} \qquad (3)$$

Le maximum du pH se produit lorsque :

$$e^{\sigma}\left[\left(\frac{D_i}{D_o}\right)\frac{d}{d\left(\frac{D_i}{D_o}\right)}e^{\sigma} - 1\right] - 2\,\frac{X_o}{\frac{D_i}{D_o}} = 0 \qquad (4)$$

II - INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX A L'AIDE DE LA LOI DE VARIATION

Les résultats expérimentaux peuvent être interprétés facilement et surtout généralisés à l'aide des formules explicitées ci-dessus. Nous étudierons successivement :

a) le phénomène général, son allure, la position des maximum,
b) l'influence du facteur finesse,
c) l'influence de la force ionique du milieu.

α) Généralité du phénomène - Allure - Position des maximum

Le phénomène est absolument général, mais les courbes de variation du pH en fonction de la dilution ne sont pas superposables. Non seulement le pH, donc le X_0 initial, varie avec chaque terre, mais le coefficient de l'équation explicitant Z, c'est-à-dire θ, p et q, varie également avec chaque sol.

Les résultats ci-après montrent comment varient, pour diverses terres, la courbe des pH en fonction de la dilution et la fonction σ caractéristique de l'équilibre de Donnan.

VOLUME D'EAU	100 cc	100 cc	100 cc	100 cc	100 cc
POIDS DE TERRE	200 g	100 g	10 g	5 g	0,1 g
DILUTION $\frac{D_i}{D_o}$	1	2	20	40	2000
Terre n° 1 : pH	8.47	8.55	8.97	8.86	7.43
Terre n° 2 : pH	8.40	8.63	8.28	8.02	6.40
Terre n° 3 : pH	8.20	8.29	8.37	8.40	6.55
Terre n° 4 : pH	7.48	7.53	7.94	7.90	6.40

$$\text{Terre n° 1 : } \sigma = -2,37 \left[\left(\text{Log}\frac{D_i}{D_o}\right)^2 - 3.86\left(\text{Log}\frac{D_i}{D_o}\right) + 5.94\right]$$

$$\text{Terre n° 2 : } \sigma = -1,635 \left[\left(\text{Log}\frac{D_i}{D_o}\right)^2 - 2.06\left(\text{Log}\frac{D_i}{D_o}\right) + 7.37\right]$$

$$\text{Terre n° 3 : } \sigma = -1,865 \left[\left(\text{Log}\frac{D_i}{D_o}\right)^2 - 3.49\left(\text{Log}\frac{D_i}{D_o}\right) + 7.59\right]$$

$$\text{Terre n° 4 : } \sigma = -1,55 \left[\left(\text{Log}\frac{D_i}{D_o}\right)^2 - 3.96\left(\text{Log}\frac{D_i}{D_o}\right) + 10.17\right]$$

Il n'est donc pas possible de prévoir pour une terre inconnue la variation que subira son pH en fonction de la dilution, puisque les coefficients à l'équation représentative varient avec chaque cas d'espèce, bien qu'ils restent situés dans des domaines assez voisins, comme le montrent les chiffres ci-dessus.

θ, p et q variant avec chaque terre, il n'est pas non plus possible de prévoir à l'avance, sur une terre inconnue, la dilution correspondant au maximum de $Z = e\sigma$ et encore moins celle qui correspond au maximum du pH.

On doit noter cependant qu'il suffirait de trois déterminations effectuées sur une même terre à des dilutions différentes pour déterminer l'équation du second degré en fonction de $\left(\log \frac{D_i}{D_o}\right)$ représentative de σ, puis l'équation $Z = e\sigma$ et enfin le maximum du pH d'après l'équation (4). On pourrait également, toujours d'après l'équation Z, calculer le pH aux diverses dilutions grâce à l'équation (2) ; cette possibilité est intéressante au point de vue théorique.

b) Influence du facteur finesse

Si l'on admet que l'existence d'un maximum du pH résulte de l'existence d'équilibres de Donnan liés à la présence de colloïdes dans le milieu, on doit s'attendre à ce que la fonction Z, représentant le nombre d'ions non diffusibles formés par les micelles, aille en croissant avec la finesse de la terre soumise aux déterminations, toutes choses égales d'ailleurs, puisqu'un accroissement de finesse est corrélatif d'un accroissement de surface, donc de réactivité du milieu.

C'est exactement ce qui se vérifie dans l'intervalle des dilutions expérimentées.

L'exemple ci-dessous rend compte des différences dues au facteur finesse.

DILUTION $\frac{D_i}{D_o}$	1	2	20	40	2000
Terre tamisé au tamis de 100 : pH	8.06	8.27	8.48	8.50	6.63
Terre tamisée au tamis 2 mm : pH	8.20	8.29	8.37	8.40	6.55

$$\sigma \text{ tamis } 100 = -2.36 \left[\left(\log \frac{D_i}{D_o}\right)^2 - 3.52\left(\log \frac{D_i}{D_o}\right) + 6.11\right]$$

$$\sigma \text{ tamis } 2_{mm} = -1.865 \left[\left(\text{Log} \frac{D_i}{D_o} \right)^2 - 3.49 \left(\text{Log} \frac{D_i}{D_o} \right) + 7.59 \right]$$

La fonction $Z = e^{\sigma}$ est donc fortement perturbée par la variation de la finesse et la complexité de l'équation représentative du pH ne permet pas de prévoir à l'avance l'incidence de l'augmentation de Z sur la courbe de pH.

Expérimentalement, il semble que dans les terres alcalines normales l'accroissement de la finesse entraîne une diminution du pH ; par contre dans les terres sans colloïdes ou pauvres en colloïdes l'accroissement de la finesse conduit à une augmentation du pH.

c) Influence de la force ionique du milieu

Jusqu'ici nous n'avons tenu aucun compte de la force ionique du milieu, ni du coefficient d'activité des charges. Or, suivant la nature de la terre, la force ionique :

$$y = \frac{1}{2} \sum cv^2 \quad \text{avec} \quad \begin{cases} c = \text{concentration des ions par litre,} \\ v = \text{valeur de l'ion considéré,} \end{cases}$$

peut atteindre 0,180 à la dilution correspondant à 200 g de terre pour 100 cm³ d'eau, pour tomber à 0,000065 pour la dilution de 0,1 g de terre dans 100 cm³ d'eau.

C'est-à-dire que le coefficient d'activité moyen des ions, calculé par la formule $- \log f = 0{,}5 \sqrt{y}$, conduit à des valeurs de $f\pm$ comprises entre 0,6 et 0,99 suivant la dilution.

Les valeurs expérimentales du pH relevées au potentiomètre fournissent en fait le produit de la concentration en ions OH^- par le coefficient d'activité de ces ions à la dilution considérée.

On peut donc, à partir de ces valeurs expérimentales du pH, calculer pour chaque dilution les valeurs de Z corrigées par :

$$Z_{i \text{ (corrigé)}} = \frac{(X_i)^2 - \left[\dfrac{X_o \times f_i}{\dfrac{D_i}{D_o} \times f_o} \right]^2}{\left[\dfrac{X_o \times f_i}{\dfrac{D_i}{D_o} \times f_o} \right]}$$

Dans cette formule :

X_i est le produit de la concentration en ions $(OH)^-$ par l'activité à la dilution de l'essai ; il reste identique à la valeur qu'il avait dans le calcul initial ;

X_0 est le produit de la concentration en ions $(OH)^-$ par l'activité à la dilution d'origine D^0 ;

f_i est le coefficient d'activité moyen déduit de la force ionique à la dilution D_i ;

f_0 est le coefficient d'activité moyen déduit de la force ionique à la dilution D_0.

Les forces ioniques aux diverses dilutions peuvent être calculées approximativement à partir de la force ionique à la dilution d'origine, déterminée par analyse des ions de la solution et à l'aide de :

$$y = \frac{1}{2} \sum cv^2$$

En effectuant ces calculs on obtient pour Z des valeurs que l'on peut également exprimer en fonction de la dilution par une relation exactement du même type que celle établie précédemment et assez peu différente dans ces coefficients.

C'est ainsi que l'on obtient pour fonction représentative de Z :

— sans correction d'activité :

$$Z = e^{-2.36 \left| \left(\text{Log} \frac{D_i}{D_0}\right)^2 \; 3.52 \left(\text{Log} \frac{D_i}{D_0}\right) + 6.11 \right|}$$

— avec correction d'activité :

$$Z = e^{-2.27 \left| \left(\text{Log} \frac{D_i}{D_0}\right)^2 \; 3.66 \left(\text{Log} \frac{D_i}{D_0}\right) + 6.24 \right|}$$

Notons cependant au passage que la somme des carrés des écarts entre la courbe théorique et la courbe expérimentale est légèrement inférieure dans le cas des valeurs de Z non corrigées.

Ce phénomène n'a rien d'extraordinaire ; il est probable qu'en un milieu aussi complexe la théorie des activités de Debye et Huckene peut s'appliquer sans précaution, surtout pour les forces ioniques assez élevées.

Une confirmation de cette opinion est d'ailleurs donnée par l'étude des pH en fonction de la dilution lorsqu'on utilise, au lieu d'eau distillée,

une solution de KCl par exemple à 5 ‰, ce qui augmente la force ionique du milieu de 0,134 environ. Les coefficients d'activité sont nettement diminués (intervalle 0,40 — 0,66 par exemple au lieu de 0,60 — 0,99) et l'on constate corrélativement une énorme augmentation de la proportion d'ions non diffusibles, telle que la notion d'équilibre de Donnan (ou tout au moins son calcul) perd toute signification. La force ionique empêche manifestement les charges de décoller du colloïde.

III - CAS DES TERRES ACIDES

Les terres acides sont peu nombreuses au Maroc ; il était cependant intéressant du point de vue théorique d'examiner là aussi la variation du pH avec la dilution.

A première vue le comportement des terres acides paraît assez semblable à celui des terres alcalines, c'est-à-dire que le pH croît peu à peu lorsqu'on part des solutions concentrées, passe par un maximum, puis décroît au fur et à mesure qu'augmente la dilution.

Mais si l'on applique les hypothèses qui nous ont servi pour les terres alcalines et que l'on essaie d'expliciter Z, représentatif des équilibres de Donnan, on constate cette fois que la loi de variation de Z est beaucoup plus complexe que celle trouvée dans le cas des sols alcalins.

On pourrait à la rigueur la formuler $Z = e^x$. X pourrait s'écrire sous la forme d'une cubique en fonction de (Log $\frac{D_i}{D_o}$) ; mais cette fonction ne présente ni maximum, ni minimum dans l'intervalle des dilutions étudiées ; elle est au contraire constamment croissante avec la dilution, ce qui évidemment n'a aucun sens au point de vue physico-chimique.

Est-ce à dire que nous devons renoncer dans le cas des terres acides à l'hypothèse des équilibres de Donnan pour expliquer les variations du pH avec la dilution ? Nous ne le pensons pas. Les difficultés rencontrées proviennent probablement de ce que les terres acides ont un pouvoir tampon beaucoup plus faible que les terres alcalines et qu'à chaque dilution on introduit dans le milieu une certaine quantité de CO_2 non négligeable (1,4 10^{-5} mol/g par litre). L'influence perturbatrice du CO_2 ne peut être calculée exactement, car elle dépend non seulement de la constante d'ionisation de l'acide carbonique, mais encore des constantes d'ionisation des acides de la terre. Un essai, effectué en considérant la constante d'ionisation de l'acide carbonique comme non modifiée, conduit à des valeurs de Z négatives (courbe avec minimum). On voit l'importance de la perturbation apportée par CO_2 dans ce cas.

Avec les terres alcalines le phénomène est beaucoup moins accentué, la réserve alcaline de la terre jouant le rôle de tampon.

Il serait intéressant de reprendre ces essais avec les terres acides en opérant en milieu privé de CO_2 ; malheureusement un montage expérimental permettant d'effectuer des essais en série, en atmosphère privée de CO_2, est très difficile à réaliser avec les moyens dont nous disposons.

CONCLUSIONS

Les pH des terres varient avec la dilution du mélange de terre et d'eau. En partant des mélanges fortement concentrés le pH commence par croître, passe par un maximum, puis décroît lorsque la dilution continue à augmenter.

Il est possible, pour les terres alcalines, d'expliciter dans chaque cas particulier la valeur du pH à une dilution donnée, en fonction du pH de la solution concentrée d'origine, de la dilution donnée et d'une fonction Z caractéristique d'un équilibre de Donnan représentant la concentration en ions non diffusibles donnés par les micelles des colloïdes de la terre.

La fonction Z peut s'exprimer sous la forme :

$$Z_i = e^{-\theta\left[\left(\mathrm{Log}\frac{D_i}{D_o}\right)^2 + p\left(\mathrm{Log}\frac{D_i}{D_o}\right) + q\right]}$$

θ, p et q sont des paramètres qui varient :

1° avec chaque sol ;

2° avec la finesse d'un même sol.

$$D_o = \frac{\text{quantité d'eau}}{\text{poids de terre}}$$ (dans la solution concentrée d'origine).

$$D_i = \frac{\text{quantité d'eau}}{\text{poids de terre}}$$ (à une dilution quelconque).

Le pH à la dilution D_i peut être calculé par :

$$pH = 14 + \mathrm{Log}_{10}\sqrt{\left[\frac{10^{(pH_0-14)}}{\frac{D_i}{D_o}}\right]\left[\frac{10^{(pH_0-14)}}{\frac{D_i}{D_o}} + e^{-\theta\left[\left(\mathrm{Log}\frac{D_i}{D_o}\right)^2 + p\left(\mathrm{Log}\frac{D_i}{D_o}\right) + q\right]}\right]}$$

(pH_0 étant le pH de la solution à la concentration D_o).

Il n'est pas possible de déterminer θ, p et q sans la connaissance de pH_0 et d'au moins deux autres valeurs expérimentales du pH pour deux autres dilutions.

Les dilutions correspondant aux maximum de la fonction Z varient avec chaque terre, ainsi que le laisse prévoir l'examen de la formule.

Les dilutions correspondant aux maximum du pH varient également avec chaque terre ; elles sont en général différentes de celles pour lesquelles se produisent les maximum de Z.

Avec les terres acides le phénomène de maximum du pH existe également ; il n'a pu être mis en équation du fait vraisemblablement de la perturbation apportée par la présence du gaz carbonique libre contenu dans l'eau en équilibre avec l'air.

L'existence du phénomène de variation, avec maximum du pH à la dilution, le cas d'espèce posé pour chaque sol, rendent nécessaire, pour que les résultats des divers laboratoires soient comparables, l'adoption d'une convention internationale fixant la dilution à laquelle doit être déterminé le pH, la finesse de la terre et même le traitement subi par la terre à partir de la prise d'échantillon ; l'intervention des colloïdes du sol dans l'équilibre peut être en effet modifiée selon la température à laquelle la terre aura été portée avant le tamisage par exemple et selon le degré de dessiccation.

Ce problème avait déjà été abordé par différents auteurs ; A. Desannottes, en particulier, avait préconisé la prise du pH sur pâte épaisse pour se rapprocher des conditions normales du sol. L'argument serait valable si aucun autre facteur ne risquait de perturber le phénomène ; mais la dessiccation seule suffit pour modifier la fonction Z et, partant, le pH, à une dilution donnée.

Avec les terres alcalines l'idéal serait d'opérer la prise du pH à la dilution correspondant au pH maximum, c'est-à-dire au pH qui a le plus de chances d'être dangereux pour la végétation. La détermination de cette dilution est possible mais n'est pas facile ; elle exige trois mesures au moins de pH et des calculs assez compliqués ; mais expérimentalement, avec les terres alcalines normales, les maximum des pH se produisent pour des dilutions comprises entre 5 et 20 g de terre pour 100 g d'eau (avec

des terres passées au tamis de 2 mm). Il semble donc qu'il y aurait intérêt à adopter une dilution standard voisine de 15 g de terre pour 100 g d'eau ; on aurait ainsi, non seulement des chiffres comparables entre les divers laboratoires, mais encore on aurait plus de chances de détecter les valeurs de pH dangereuses pour la végétation, valeurs pouvant parfois nécessiter un amendement du sol.

N. EL GHORFI,
1957

RICHESSE EN ELEMENTS FERTILISANTS DES SOLS DU MAROC

Les rendements des cultures sont influencés principalement par les facteurs climatiques et la richesse des sols en éléments fertilisants. Azote, acide phosphorique et potasse ont une influence primordiale sur la croissance, la fructification et la résistance aux maladies des plantes.

S'il est pratiquement impossible en grande culture d'agir sur les conditions climatiques, on peut, par l'apport d'engrais, pallier les carences que le sol peut présenter en éléments fertilisants.

Cependant il importe que les doses et la composition des engrais soient judicieusement déterminées, sinon l'on risque de créer un déséquilibre dans le milieu nutritif des racines et la récolte s'en ressentira en quantité et en qualité. A tout le moins, si l'usage d'engrais mal équilibré ou employé sans discernement n'a pas une influence néfaste sur la croissance des végétaux, il aura une répercussion sur l'équilibre économique de l'exploitation, en causant une dépense n'apportant aucun profit en contre-partie.

Il convient donc de connaître les besoins du milieu auquel on va confier les semences ; l'analyse du sol est évidemment le moyen idéal d'obtenir les renseignements demandés. Toutefois il peut être nécessaire d'avoir une vue d'ensemble, quand ce ne serait par exemple que pour chiffrer les besoins en engrais d'une région ou même d'un pays entier, de prévoir des implantations d'usines ou même d'établir un plan de répartition de certaines cultures.

Le *Laboratoire Officiel d'Analyses et de Recherches Chimiques,* qui depuis plus de 30 ans effectue des analyses de sol au point de vue agrologique, possède une importante documentation ayant trait aux échantillons prélevés par les inspections de l'agriculture et repérés par leurs coordonnées géographiques.

TYPES DE SOLS

En se basant sur l'analyse physique et en ne tenant pas compte des types intermédiaires, dans un but de généralisation et de simplification, on peut classer les sols agricoles du Maroc en trois grandes catégories :

Sols sableux. — Leur contexture est à prédominance d'éléments fins, en majeure partie siliceux ; par conséquent, peu ou pas de calcaire, teneur en argile ne dépassant pas 10 % (en général de 2 à 5 %).

Sols argileux. — A teneur très élevée en argile, jusqu'à 85 % ; le reste de leurs éléments est fin ou très fin ; teneur en calcaire très faible ou même nulle dans la plupart des cas.

Sols argilo-calcaires. — Bien équilibrés au point de vue de leurs constituants physiques ; leur teneur en calcaire varie de 10 à 25 %.

REPARTITION GEOGRAPHIQUE

Les sols *sableux* constituent une bande qui s'étend le long de la côte Atlantique depuis Essaouira jusqu'à la limite de l'ex-zone nord et vraisemblablement jusqu'à Tanger. Cette bande côtière a une largeur moyenne de 10 à 50 km avec une pointe de 75 km entre Rabat et Khémisset.

Les sols *argileux* font suite aux sols sableux depuis Safi jusqu'à Kénitra, puis s'infléchissent vers l'Est pour redescendre ensuite vers Meknès et Fès.

Quant aux sols *argilo-calcaires*, ils constituent des îlots répartis en divers points du pays, principalement autour de Marrakech, Kasba-Tadla, Sidi Kacem, Ouezzane et au nord de Fès.

RICHESSE EN ELEMENTS FERTILISANTS

Les Tableaux I, II et III donnent un aperçu de la richesse de ces sols en éléments fertilisants.

Les sols *sableux* sont en général bien pourvus d'azote et de potasse mais leur teneur en acide phosphorique est faible ou nulle. Comme ils se réchauffent rapidement au printemps, la nitrification est active et le départ de la végétation y est précoce.

Les sols *argileux* sont bien pourvus en général en éléments fertilisants; leur point faible est souvent le manque d'acide phosphorique. Ce sont de bonnes terres de grande culture par les années pluvieuses, car ils craignent la sécheresse qui les durcit et les crevasse.

Dans le type de sols *argilo-calcaires* aussi se rencontre fréquemment une déficience en acide phosphorique, alors que les réserves d'azote et de potasse sont largement suffisantes.

TABLEAU I — SOLS SABLEUX

COORDONNÉS LAMBERT		SITUATION GÉOGRAPHIQUE	CALCAIRE %	POUR MILLE DE TERRE FINE					
				AZOTE		ACIDE PHOSPHORIQUE ASSIMILABLE		POTASSE ASSIMILABLE	
X	Y								
172	150	S.E. Safi	2.24	1.14	Riche	0.18	Pauvre	0.83	Riche
199	138	N. Safi	2.51	1.50	Riche	0.03	Très pauvre	0.43	Riche
318	343	S.E. Fédala	0.62	1.22	Riche	0.31	Suffisant	0.66	Riche
334	349	S. Bouznika	Traces	1.60	Riche	0.59	Riche	0.55	Riche
410	410	Sidi Yahia	Traces	0.74	Pauvre	0.12	Pauvre	0.41	Riche
400.5	170.5	O. Tiflet	Traces	0.74	Pauvre	0.09	Très pauvre	0.29	Moyennement riche
439	357	Khémisset	Traces	1.50	Riche	0.44	Riche	1.71	Très riche
430	480	O. El Ksar el Kébir	Traces	0.70	Pauvre	0.28	Juste suffisant	0.46	Riche

TABLEAU II — SOLS ARGILEUX

COORDONNÉS LAMBERT		SITUATION GÉOGRAPHIQUE	CALCAIRE %	POUR MILLE DE TERRE FINE					
				AZOTE		ACIDE PHOSPHORIQUE ASSIMILABLE		POTASSE ASSIMILABLE	
X	Y								
158	220.5	S.E. Chemaia	0.94	2.18	Très riche	0.20	Pauvre	0.45	Riche
194	178	Djema Sahim	Traces	1.19	Riche	1.95	Très riche	0.83	Riche
324	331	Entre Oued Mellah et Oued Néfifik	3.50	1.05	Riche	0.50	Pauvre	0.38	Riche
280.4	320.7	Bouskoura	Traces	0.93	Moyennement riche	Traces	Nul	0.40	Riche
293	264	Settat	1.52	2.58	Très riche	1.89	Très riche	0.46	Riche
296	301	Berréchid	4.52	1.59	Riche	0.10	Très pauvre	0.25	Moyennement riche
399.7	196.4	Béni-Mellal	2.64	2.11	Très riche	0.75	Riche	0.54	Riche
364.2	482.8	Meknès	3.42	1.62	Riche	Traces	Nul	0.25	Moyennement riche
342	502	N.O. Azrou	1.73	5.00	Très riche	0.20	Pauvre	1.28	Très riche
346	497	El Hajeb	Traces	1.74	Riche	0.19	Pauvre	0.18	Pauvre
326	476	N.O. Azrou	Traces	0.68	Pauvre	Traces	Nul	0.29	Moyennement riche

TABLEAU III — SOLS ARGILO-CALCAIRES

COORDONNÉS LAMBERT		SITUATION GÉOGRAPHIQUE	CALCAIRE %	POUR MILLE DE TERRE FINE					
				AZOTE		ACIDE PHOSPHORIQUE ASSIMILABLE		POTASSE ASSIMILABLE	
X	Y								
474	360	S.E. Meknès	16.30	2.10	Très riche	0.91	Riche	0.84	Riche
485	343	Agouray	30.20	1.99	Riche	Traces	Nul	0.69	Riche
404	386.5	Ouest d'El Kansera	18.80	7.06	Très riche	Traces	Nul	0.39	Riche
511	368	Aïn Taoujdat	9.09	1.35	Riche	0.12	Très pauvre	0.65	Riche
552.5	359.2	Sefrou	25.00	1.73	Riche	Traces	Nul	0.47	Riche
586	334	El Aderj	37.90	0.93	Moyennement riche	Traces	Nul	1.02	Très riche
405	631	Taza	27.30	0.96	Moyennement riche	0.47	Pauvre	0.48	Riche
462	465	O. Ouezzane	24.40	1.18	Riche	0,26	Pauvre	0.75	Riche
406	242	Boujad	20.00	1.39	Riche	0.29	Pauvre	0.42	Riche
182	110	Chichaoua	20.60	1.49	Riche	1.35	Très riche	0.49	Riche
313	163	El Kelaa des Sgharna	10.65	1.17	Riche	0.31	Pauvre	1.06	Très riche

CONCLUSIONS

Des trois tableaux précédents, on peut tirer les conclusions générales suivantes :

Si leurs teneurs en azote et potasse sont en général suffisantes, l'équilibre des sols du Maroc, au point de vue éléments fertilisants, n'est en général pas réalisé, par suite du manque d'acide phosphorique.

En vertu de la loi du minimum, c'est l'élément dont la proportion est la plus faible qui régit les récoltes en qualité et en quantité.

On ne pourra donc avoir dans ce pays de bons rendements que si l'on enrichit les sols en acide phosphorique.

Or, la nature a doté le Maroc de réserves quasi inépuisables de cet élément, sous forme de phosphate tricalcique. Malheureusement l'action de ce dernier dans les sols qui nous occupent ne peut être qu'à longue échéance. En effet, sous cette forme entièrement neutralisée l'acide phosphorique n'a d'influence immédiate sur le rendement des cultures que dans les terres acides et ces dernières sont rares ici.

Il faut donc utiliser une forme soluble.

On a le choix entre le superphosphate, le phosphate bicalcique et les scories. Pratiquement l'industrie locale fournissant du superphosphate, cette forme d'engrais phosphaté sera peut-être la plus avantageuse du point de vue économique et entrera dans les mélanges d'engrais.

L'idéal, évidemment, serait, tout en utilisant des engrais à action rapide, d'enrichir la terre en acide phosphorique par des apports importants de phosphate tricalcique. Mais on se heurte alors à des nécessités d'investissements importants dont la rentabilité ne peut être qu'à long terme.

J. CABY
Laboratoire Officiel d'Analyses et Recherches Chimiques,
Casablanca, octobre 1958

ETUDE DE LA STRUCTURE DU SOL *

La connaissance des différents éléments de la structure permet de l'apprécier et de la corriger, si elle est défavorable à la croissance des plantes. Différentes méthodes d'analyse doivent alors entrer en jeu pour acquérir cette connaissance, *car il n'existe pas de méthode unique pour caractériser la structure. La recherche d'une telle méthode serait d'ailleurs illusoire.* En effet, l'état physique d'un sol est la résultante de plusieurs causes et pour caractériser la structure des sols, nous devons en général tenir compte de l'état de leur agrégation, du type de leur mode d'assemblage qui détermine l'un des états fondamentaux structuraux, des caractères de la porosité (importance et nature) et des conditions de la stabilité de l'état structural donné. Or, chaque élément de la structure demande des méthodes d'analyses propres à lui seul, soit chimiques, soit physiques, soit mécaniques. *Il est donc nécessaire d'établir tout un système d'analyses* que nous pouvons diviser en quatre groupes :

1) celles qui se rapportent à la définition de la porosité ;
2) celles qui se rapportent à la définition de la microstructure ;
3) celles qui se rapportent à la définition de la macrostructure ;
4) celles qui se rapportent à la définition de la stabilité structurale.

Un tel système d'analyses est en voie d'élaboration au laboratoire de pédologie de la Sous-Direction de la Recherche Agronomique du Maroc.

Les méthodes d'analyse utilisées sont groupées dans notre ouvrage, « Notions de Pédologie appliquée », tome IV, « Méthodes d'analyse ». Ces méthodes sont celles qu'on emploie habituellement pour l'analyse physique des sols. Nous avons seulement apporté quelques correctifs sans chercher à les modifier profondément ou à les remplacer. Par contre, nous avons imaginé les représentations numériques en utilisant largement les calculs, soit pour mettre en évidence les relations qui existent entre les différents caractères étudiés, soit pour rendre plus expressifs les résultats analytiques (calculs des indices).

Etude de la porosité

Le sol est un corps poreux et le calcul de la porosité totale nous permet, en nous basant sur son importance, de définir le *degré de tassement du sol* (caractère quantitatif). La porosité totale au dessus de 60 % est jugée élevée, de 60 à 40 % moyenne et au dessous de 40 %

---

* Extrait des Communications de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture de Gand, T. 26, n° 1, 1959.

basse. Elle est déterminée d'après les données de densités réelle et apparente sur place.

La connaissance de la nature des pores, fins ou gros (caractères qualitatifs), est nécessaire pour établir le *degré de compacité du sol*. Dans ce but nous calculons le rapport entre la porosité fine Pf et la porosité totale Pt, ou le rapport 100 Pf/Pt. Le sol sera compact si ce rapport est élevé (au dessus de 70 %), poreux si ce rapport est inférieur à 40-50 %, peu compact ou peu poreux entre 50 et 70 %. Dans nos études nous déterminons la porosité fine d'après les données de l'humidité équivalente (quantité d'eau retenue dans le sol par des forces supérieures à une atmosphère), rapportées au volume total du sol, en tenant compte de l'augmentation de la densité de l'eau au-dessous du point de flétrissement.

Etude de la microstructure

La nature et la distribution des agrégats (grumeaux), assemblages terreux relativement stables dans l'eau, caractérisent la microstructure des sols.

Pour définir la microstructure nous utilisons les résultats du tamisage humide au cours duquel le sol se délite en un certain nombre de fractions. Ces résultats nous permettent de calculer le diamètre moyen des agrégats « fictifs », composés uniquement de particules terreuses fines inférieures à 0,2 mm, ou indice Gaf, caractéristique pour un type de sol donné. Nous complétons ces renseignements par les mesures de la turbidité des extraits aqueux du sol, car dans le cas où les ciments colloïdaux se dispersent, au moins en partie, les extraits aqueux deviennent opalescents et même troubles.

Etude de la macrostructure

Les particules élémentaires et les agrégats terreux restent rarement « libres » sans aucune cohésion entre eux. Leur mode d'assemblage, discernable à l'œil nu et qui conditionne l'aspect extérieur de *la macrostructure*, résulte, soit de la prise en masse, soit de l'agglomération en mottes, soit enfin de la fissuration.

Malgré la diversité des formes d'assemblage il est possible de distinguer trois états fondamentaux de la macrostructure du sol :

1) *état particulaire*, quand le sol est constitué par des particules élémentaires ou agrégats qui ne sont pratiquement pas assemblés ;

2) *état fondu*, quand le sol se présente sous forme d'une masse uniforme sans fissures multiples qui délimiteraient des mottes ;

3) *état motteux,* quand le sol est formé par la juxtaposition de mottes de formes et de dimensions variables. Cette dernière classe de la macrostructure comprend aussi bien des mottes à formes arrondies provenant de l'agglomération des particules du sol que celles à formes anguleuses provenant de la fissuration de la masse du sol humide.

Le tamisage à sec nous permet de rapprocher la structure du sol à l'un des trois types fondamentaux. Nous calculons d'abord, d'après les résultats de tamisage, le diamètre moyen des fractions de tamisage, indice Gt. Pour indiquer l'état de fissuration du sol, nous divisons l'épaisseur de l'horizon E par le diamètre moyen des fractions Gt. Le chiffre obtenu constitue l'*indice de continuité C de l'horizon ou l'indice Nf, nombre de fentes.* Cet indice qui se rapproche de 1 (au-dessous de 10/20) dans les sols à structure fondue, sera relativement élevé dans les sols à structure motteuse (20-100/200), et très élevé dans les sols à structure particulaire (au-dessus de 200). Nous complétons ces renseignements par le calcul du pourcentage des mottes (assemblages terreux individualisés supérieurs à 2 mm, quelles que soient leur taille ou leur forme) par rapport à la totalité de la masse terreuse du sol, ou *indice* Am et leur *grosseur moyenne* Gm.

L'examen morphologique nous permet de définir *la forme des mottes* si elles existent : arrondie ou anguleuse, cubique, prismatique ou plane.

Nous étudions ensuite les caractères de *la porosité des mottes* ou des « éclats de prélévement » (des sols à structure fondue), en faisant intervenir cette fois-ci la densité apparente des mottes ou des éclats.

D'une manière générale, dans les sols à structure fondue les valeurs de porosité des éclats de prélèvement sont voisines de celles de la porosité totale. Il en est de même dans les sols à structure motteuse par agglomération. Parfois la porosité de telles mottes peut être plus grande que la porosité totale du sol.

Par contre, dans les sols à structure motteuse par fragmentation la porosité mottière à l'état sec est beaucoup plus basse que leur porosité totale. Ceci provient du fait que les mottes, généralement de forme anguleuse, subissent en se desséchant le retrait, dont la valeur varie avec la nature du sol. Inversement, au cours de l'humidification, les mottes de tels sols foisonnent. Cette aptitude au foisonnement des mottes est traduite par le rapport entre le volume éventuel des pores remplis d'eau capillaire à l'état humide Pmh et la porosité des mottes à l'état sec Pms, soit le rapport Pmh/Pms.

Dans les sols qui subissent le foisonnement au cours de l'humidification et le retrait au cours de la dessication, ce rapport est supérieur à 1.

L'apparition perceptible du phénomène du foisonnement (et du retrait) est liée à la grosseur des mottes. Dans les sols à macrostructure grossière il est facile d'observer la formation des fissures et la variation de leur largeur, tandis que dans les sols à macrostructure fine, les variations de la largeur de petites fissures ne seront pas perceptibles à l'œil nu. Pourtant les deux sols peuvent avoir le même pourcentage de foisonnement. Dans les sols où le rapport Pmh/Pms est inférieur à 1, il existe à l'intérieur des mottes deux sortes de pores : macropores qui restent toujours aérés, et micropores qui se remplissent d'eau au cours de l'humidification.

Un autre indice en relation avec la porosité mottière, et qui permet de fixer les conditions du travail du sol, est le rapport entre la limite inférieure de plasticité Lip et la porosité mottière à l'état sec. Ainsi dans les sols qui foisonnent, ce rapport 100 Lip/Pms se rapproche de 100. Autrement dit, dans ces sols la friabilité peut apparaître au moment où le retrait prend fin et inversement l'apparition de l'état plastique coïncide avec le début du foisonnement du sol. Dans d'autres terres il peut dépasser largement 100, c'est à dire le sol doit foisonner en absorbant une certaine quantité d'eau avant de passer à l'état plastique. Enfin, dans les sols qui apparemment ne changent pas leur volume au cours de la variation de leur état hydrique (Pmh/Pms infér. à 1), la valeur de la limite inférieure de plasticité reste généralement inférieure à la porosité des mottes à l'état sec (100 Lip/Pms inf. à 100).

Etude de la stabilité structurale

Suivant la nature des sols, l'état structural peut subir ou non des modifications, si les conditions du sol changent. La structure du sol sera instable dans le premier cas, stable dans le deuxième. Les modifications dans le mode d'assemblage des particules terreuses (ou passage d'un état structural à l'autre) peuvent affecter, soit la macrostructure seule, soit la microstructure et la macrostructure à la fois, soit enfin la porosité. Il faut remarquer, à ce propos, que la persistance de l'état structural donné ne caractérise pas toujours une bonne structure agricole.

Le changement de l'état structural du sol peut se produire (à l'état actuel de nos connaissances) par la dispersion des ciments (stabilité de la microstructure) ou sous l'effet mécanique de l'eau ou de l'air (stabilité de la macrostructure). Il est bien entendu que l'instabilité de la microstructure provoque celle de la macrostructure.

Ainsi, les déterminations de la turbidité des extraits aqueux à différents pH nous permettent de classer les sols en trois catégories suivant leur résistance à la dispersion :

1) sols à microstructure instable dans lesquels la dispersion débute au-dessous du pH propre du sol ;

2) sols à microstructure peu stable dans lesquels la dispersion débute au-dessus du pH du sol, mais le seuil de dispersion rapide correspond aux faibles valeurs de basicité ;

3) sols à microstructure stable, dans lesquels la dispersion débute bien au-dessus du pH propre du sol et le seuil de dispersion rapide correspond aux valeurs élevées de basicité.

L'étude du rapport entre la limite supérieure de plasticité Lsp et la porosité totale, soit le rapport 100 Lsp/Pt, et entre la limite de fluidité et la porosité totale, soit le rapport 100 Lf/Pt nous apporte des renseignements sur les conditions de la stabilité de la macrostructure vis-à-vis de l'eau.

Ainsi, dans les sols où le rapport 100 Lsp/Pt dépasse 100 les conditions de déplacements spontanés des particules terreuses ne seront jamais réalisées, si la porosité totale ne change pas. Par contre, cette possibilité existe dans les sols au rapport 100 Lsp/Pt inférieur à 100. Ici nous pouvons distinguer deux cas : dans le premier, la limite de fluidité reste supérieure à la porosité totale et, dans le deuxième, cette limite n'atteint pas la valeur de la porosité totale. Dans le premier cas la structure du sol gorgé d'eau est peu stable tandis que dans le deuxième cas elle est franchement instable.

Conclusions

Ainsi il est possible d'élaborer un système d'analyses, en partant d'un nombre restreint de déterminations, qui nous permet de préciser l'état structural du sol et de mettre en évidence ses caractères particuliers pour chaque type de sol. En partant de ces bases il sera possible de trouver dans chaque cas particulier des méthodes adéquates pour corriger ou pour modifier l'état structural du sol et de suivre les variations de cet état structural sous l'effet de différents traitements.

G. BRYSSINE

APPRECIATION DE LA STRUCTURE DU SOL SUR PLACE *

Un des problèmes les plus importants que posent les recherches pédologiques, prospections ou études agro-pédologiques, est la définition correcte du type de la structure. Or, la description morphologique de la structure telle qu'on la pratique actuellement, trop sujette à l'impression personnelle de l'observateur, ne traduit pas sa nature dynamique. Cette nature dynamique est caractéristique d'ailleurs de tous les processus du sol, dont la structure est une des manifestations. La forme même de l'expression de l'état structural du sol, exclusivement littéraire, ne permet pas de bien préciser les relations qui peuvent exister, soit dans les différents horizons du même profil, soit entre deux terres appartenant au même type pédologique mais soumises à des traitements différents. Les efforts des différents auteurs ont été orientés surtout vers la codification des appellations des types de la structure et non pas à leur analyse, en décomposant la structure en ses « principes constituants ».

Pour décrire la structure, même sous forme littéraire, les pédologues font intervenir les données suivantes: *a*) formes des assemblages terreux individualisés (mottes) d'après le rapport de leurs axes (cubiques, prismatiques ou planes) ; *b*) régularité de ces formes ; *c*) tendance à présenter des angles vifs (formes anguleuses) ou des angles arrondis (formes sphériques) ; *d*) netteté de ces formes ; *e*) taille des mottes ; *f*) degré de cohésion entre elles ; *g*) leur dureté ; *h*) texture du sol. Cette énumération montre que, pour la plupart des auteurs, la notion de la structure s'applique uniquement aux caractères morphologiques des assemblages terreux individualisés. Les terres qui ne se divisent pas en mottes sont qualifiées « sans structure » ou « non structurées ».

Or, il est possible d'exprimer l'état structural du sol à l'aide des « formules structurales » en faisant intervenir dans l'ordre bien établi les différents « principes constituants » de la structure énumérés plus haut et en affectant à chacun d'eux une valeur numérique.

Pour l'établissement de ces formules, dont les bases théoriques sont exposées dans notre « Note sur l'appréciation de la structure du sol » (1), il est nécessaire d'étendre la notion de la structure à l'ensemble du sol

---

(1) Travaux de la Section de Pédologie de la Société des Sciences Naturelles et Physiques du Maroc, T. 8-9, 1954, Rabat.
* Extrait des Communications de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture de Gand, T. 26, n° 1, 1959.

et non pas uniquement aux caractères morphologiques des mottes et la considérer comme *mode d'assemblage des particules élémentaires terreuses.*

Parmi les diverses formes d'assemblage des particules élémentaires il est possible de distinguer *trois état fondamentaux de la structure du sol :* 1) *état particulaire ;* 2) *état fondu* et 3) *état motteux, aggloméré* ou *fragmentaire.* Dans la nature ces états, qui ne forment pas de catégories séparées, sont liés entre eux par *des formes de passage.*

La combinaison de trois éléments (« principes ») de la structure : *dureté-résistance à l'écrasement des morceaux D, degré d'assemblage A* et *degré de fissuration* ou de *continuité de l'horizon C* (communs aux trois état généraux), paraît suffisante pour définir les caractères de chaque état structural. Ces trois données, A, C, D, peuvent donc constituer les trois *paramètres généraux* de la structure. Toutefois, pour bien préciser les différents états structuraux, il est nécessaire de compléter les renseignements fournis par ces trois paramètres généraux par d'autres données qui sont plutôt caractéristiques de chaque état structural, et, en particulier: forme des mottes R ($H/V \gtrless 1$) pour l'état fondu, grosseur des mottes G pour l'état motteux et absence de cohésion S pour l'état particulaire.

Les relations entre les différents paramètres de la structure peuvent être représentées à l'aide d'une figure géométrique : prisme structural PFM-SRG. Les plans perpendiculaires passant par les sommets du triangle de base PFM (correspondant aux trois états structuraux P particulaire, F fondu et M motteux) et qui tournent autour des droites perpendiculaires PS, FR et MG (exprimant les valeurs des *paramètres complémentaires* S, G et R), délimitent à l'intérieur de ce corps, dans l'espace, des zones caractérisées par les différentes valeurs des paramètres A, C, D. Les plans obliques passant par les sommets du triangle supérieur SRG et les sommets opposés du triangle de base PFM délimitent à leur tour des zones caractérisées par les différentes valeurs des paramètres complémentaires SRG.

L'ensemble de ces paramètres constitue la formule structurale « ACD-SRG ».

Nous avons adopté dans cette formule les expressions $A_{0\cdot2}$, $C_{0\cdot2}$ et $D_{0\cdot2}$ pour montrer que le degré d'assemblage A peut passer de A_0 (faible ou nul) à A_2 (élevé), le degré de fissuration de C_0 à C_2 et le degré de dureté de D_0 à D_2. En ce qui concerne les paramètres complémentaires, les expressions R, G, S signifient que les formes sont régulières, la gros-

seur moyenne des mottes est caractéristique (oscillant autour d'une certaine valeur) et que les mottes (ou les particules élémentaires terreuses) sont sans cohésion. Dans le cas de mottes de formes irrégulières, de dimensions non caractéristiques et fortement liées entre elles (sols cohérents) ces expressions deviennent R_0, G_0 et S_0.

La « formule structurale » ACD-SGR nous permet de définir, à l'état actuel de nos connaissances, cinq types de structure :

I — caractérisé par la formule ACD-SGR, meuble, à formes bien définies et à dimensions de mottes bien caractéristiques, les paramètres ACD pouvant varier de 0 à 2 ;

II — caractérisé par la formule ACD-SG_0 R_0, meuble, sans mottes de forme régulière et de dimensions caractéristiques, se rapprochant du type particulaire avec A_0, $C_{0\cdot2}$ et D_0 ;

III — caractérisé par la formule ACD-S_0GR_0, cohérent avec des mottes de forme irrégulières, mais de dimensions caractéristiques, se rapprochant du type fondu avec $A_{0\cdot2}$, C_2, D_2 ;

IV — caractérisé par la formule ACD-S_0G_0R, cohérent, avec des mottes de formes régulières sans dimensions caractéristiques, se rapprochant du type motteux fragmentaire avec $A_2C_2D_2$;

V — caractérisé par la formule ACD-$S_0G_0R_0$, cohérent, sans mottes de formes régulières et de dimensions caractéristiques, se rapprochant de la structure diffuse.

Tous ces types sont liés entre eux par des formes de passage, dans lesquelles un ou plusieurs paramètres varient à la fois.

La représentation de chaque type de structure par des formules appropriées facilite sa définition. Il devient alors possible d'envisager les conditions de passage d'un type à l'autre et de prévoir les changements de la structure du sol basés sur les variations des paramètres généraux et complémentaires. Pour illustrer ces considérations, nous donnons dans le tableau I quelques « équations » des passages mutuels entre les différents états structuraux extraites de notre « Note sur l'appréciation de la structure du sol ».

La détermination de chaque paramètre est donc nécessaire pour la définition du type de structure. Malheureusement, il nous manque les méthodes physiques adéquates pour attribuer à tous les paramètres des valeurs numériques. Toutefois nous pouvons donner ici, pour les besoins de prospections pédologiques sur le terrain, quelques indications sur l'appréciation de chaque paramètre :

Paramètres généraux :

A — Degré d'assemblage — pourcentage de mottes supérieures à 2 mm. Pour bien apprécier le degré d'assemblage des particules terreuses en mottes il est nécessaire de prélever un certain volume du sol et de l'ameublir « doucement » pour bien dégager les mottes en pétrissant avec précaution entre les doigts les morceaux du sol qui peuvent être des « mottes composées », sans détruire les mottes bien individualisées :

A_0 — individualisation des mottes est nulle ou négligeable, moins de 20 % (1/5) du volume total de l'horizon ;

A_1 — elle est déjà appréciable, de 20 à 60 % (1/5 — 3/5) ;

A_2 — la majeure partie de l'horizon est constituée de mottes bien individualisées, plus de 60 % (+ 3/5).

C — degré de fissuration — nombre de fissures par horizon :

Pour calculer le nombre de fissures, on peut diviser l'épaisseur de l'horizon par la grosseur moyenne des mottes :

C_0 — fissuration élevée (horizon discontinu) plus de 100 fentes ;

C_1 — fissuration moyenne, entre 10 et 100 fentes ;

C_2 — fissuration faible (horizon continu), moins de 10 fentes.

D — degré de dureté — résistance des morceaux du sol (mottes ou éclats de prélèvement) à l'écrasement ;

D_0 — dureté faible, les morceaux du sol s'écrasent même sous une faible pression des doigts en s'effritant en poussière ;

D_1 — moyenne, ils s'écrasent sous une forte pression des doigts ;

D_2 — ils ne s'écrasent pas.

Paramètres complémentaires :

R — formes des mottes, suivant le rapport H/V ; *régulières*.
$H/V < 1$ (1/2 — 1/5) — R*s* (plane, schisteuse fragmentaire), R*sq* (squameuse arrondie) et R*t* (tétraédrique, oblique).

$H/V = 1$ (1/1—1/3) — R*c* (cubique fragmentaire) et R*n* (en noisette ou nuciforme arrondie) ;

$H/V > 1$ (3/1—10/1) R*pf* (prismatique fragmentaire, H/V — 3/1) et R*cl* (en colonnes H/V — 10/1).

R_0 — formes *irrégulières* (polyédriques) ; on peut y ajouter les index employés pour R, si l'on constate une certaine tendance vers l'orientation des formes.

G — grosseur des mottes en cm ;

G — grosseur moyenne des mottes oscille autour d'une certaine valeur ;

G_0 — mottes de dimensions variables ; grosseur moyenne est donnée à titre indicatif.

S — degré de cohésion :

S — meuble, les mottes ou les particules élémentaires grossières sont faiblement liées entre elles ; il est très facile de les dégager : un coup de pelle les déplace les unes par rapport aux autres.

S_0 — cohérent ; dans ce cas, la cohésion étant assez grande pour le retenir en place, il faut un certain effort pour dégager un morceau du sol (mottes, cailloux, éclats de prélèvement) ; suivant l'effort qu'il faut appliquer on peut distinguer : S*of* faiblement cohérent, S*om* moyennement cohérent, S*o*F-fortement cohérent.

Ces données chiffrées des paramètres permettront, nous le croyons, de fournir, même sur place, des bases objectives pour l'appréciation de la structure du sol. Les dénominations « figuratives » (grenue, nuciforme, feuilletée, prismatique, etc.) des différents types et formes de mottes, adoptées jusqu'à présent, peuvent être conservées car elles correspondent aux cas particuliers de la structure. On pourrait attribuer des valeurs numériques à ces dénominations à l'aide des paramètres généraux ACD et complémentaires SGR.

TABLEAU I

Passages mutuels des formes

a) Passages mutuels entre P et F, P et M*f*, F et M*f* (1).

	ÉTATS initial	intermédiaire	final
P	= F $A_0C_2D_0$ S G_0R_0	= $A_0C_2D_1$ S G R_0	= $A_0C_2D_2$ S_0G R_0
P	= M*f* $A_0C_0D_0$ S G_0R_0	= $A_1C_0D_0$ S G_0R	= $A_2C_0D_2$ S_0G_0R
F	= M*f* $A_2C_2D_2$ S_0G R_0	= $A_0C_1D_2$ S_0G R	= $A_2C_0D_2$ S_0G_0R

b) Passages mutuels entre P et M*a*, F et M*a*, M*f* et M*a* (2).

	ÉTATS initial	intermédiaire	final
P	= M*a* $A_0C_2D_0$ S G_0R_0	= A_0 C_2 D_{0-1} S G_0R	= A_0 C_2 D_{0-1} S G R
	$A_0C_0D_0$ S G_0R_0	= $A_{0-1}C_0$ D_0 S G R_0	= $A_{0-1}C_0$ D_0 S G R
F	= M*a* $A_0C_2D_2$ S_0G R_0	= A_0 C_2 D_{2-1} S G R_0	= A_0 C_2 D_{2-1} S G R
	$A_2C_2D_2$ S_0G R_0	= A_2 $C_{2-1}D_2$ S_0G R	= A_2 $C_{2-1}D_2$ S G R
M*f*	= M*a* $A_2C_0D_2$ S_0G_0R	= A_2 $C_{0-1}D_2$ S_0G R	= A_2 $C_{0-1}D_2$ S G R
	$A_2C_0D_0$ S_0G_0R	= $A_{2-1}C_0$ D_0 S G R	= $A_{2-1}C_0$ D_0 S G R

G. BRYSSINE

---

(1) P, état particulaire, F, état fondu, M*f*, état motteux fragmentaire.

(2) M*a*, état motteux aggloméré.

LA SALINITE DU SOL ET SES PROBLEMES

PLAN

1° Introduction.

2° Origine des sels dans le sol.

3° Caractères des sels :
   a) Solubilité.
   b) Mobilité.

4° Action des sels sur le sol.

5° Sol et plantes.

6° Utilisation et amélioration des sols salins.
   a) Classement.
   b) Amélioration.
   c) Utilisation.

1° Introduction

« Le problème des zones arides peut se résumer dans la comparaison des chiffres suivants : alors que l'étendue des terres cultivées ne représente guère que la dixième partie des terres émergées, l'étendue des zones arides ou semi-arides en représente plus du tiers. Autrement dit, pour chaque hectare de culture, trois ou quatre hectares sont à peu près inutilisés par l'homme, parce qu'ils sont déserts ou recouverts d'une végétation éparse permettant tout au plus une économie précaire de simple subsistance. Cependant, la population du monde, qui dépasse actuellement 2.600 millions d'êtres humains, s'accroît de plus en plus vite et, au rythme présent, aura doublé d'ici cinquante ans » (5). Ajoutons à ceci que « la plus grande zone de déserts et de semi-déserts (25 millions de km^2 sur les 35 millions qu'occupent au total les déserts et semi-déserts du globe) est constituée par une bande qui s'étend, sans interruption, de l'Atlantique à l'Asie du Sud-Est à travers l'Afrique du Nord, le Proche-Orient et le Moyen-Orient. Cette zone correspond, en général, aux massifs montagneux du plissement alpin (6) ». Remarquons, à titre de comparaison, que les territoires réunis de l'Union Soviétique et de la Chine n'atteignent que 33,4 millions de km^2, chiffre inférieur à celui des zones arides.

Or, malheureusement, il arrive très souvent que dans les zones arides la mise en valeur des terres, pourtant suffisamment fertiles, se heurte aux

difficultés créées par la présence des sels, soit dans le sol, soit dans l'eau. La salinité du sol, c'est-à-dire la « propriété du sol de contenir des sels » (13), devient alors le facteur limitant de la production agricole.

Il faut remarquer que tous les sols contiennent des sels (terme employé ici dans le sens chimique du mot) dans leurs solutions ; mais, tandis que dans des terres ordinaires non salines le taux global des sels solubles reste bas, il peut atteindre des proportions très élevées dans les sols salins.

2° Origine des sels dans le sol

Les causes de la salinité du sol sont multiples. Leur présence dans la masse du sol en quantité appréciable est due, soit aux facteurs géologiques, donc naturels, conditionnés par la structure et la constitution lithologique de la région, soit aux irrigations mal adaptées aux conditions locales. On peut donc parler de la *salinité naturelle* dans le premier cas, de la *salinité provoquée* dans le deuxième.

Suivant la manière dont ils sont accumulés dans le sol on peut distinguer plusieurs voies de salinisation : les sels peuvent être présents dans la roche mère, aussi bien à la surface qu'en profondeur, ou apportés par les eaux, aussi bien par le haut (salinisation superficielle) que par le bas (salinisation par la nappe). Ces différents mécanismes de la salinisation sont représentés dans le Tableau I.

TABLEAU I

ORIGINES ET CAUSES DE LA SALINITE DU SOL

ORIGINES		CAUSES	
		NATURELLES (GÉOLOGIQUES)	PROVOQUÉES (HUMAINES)
Statiques		Roches-mères salines	Dissolution des sels en profondeur et leur remontée vers le haut.
		Marécages salins	Asséchement des marécages
Dynamiques (apports)	*Superficielles*	Nappes d'épandage	Régime des irrigations : volume d'eau apportée = volume d'eau retenue. Irrigation à l'eau fortement salée.
	Profondes	Nappes souterraines proches de la surface (salées ou douces).	Remontée de la nappe salée sous l'effet de l'arrosage (à l'eau douce ou à l'eau salée). Salinisation de la nappe et sa remontée.

Il faut remarquer que, dans la plupart des cas, la salinité du sol est en relation étroite avec l'existence d'eaux salées à une faible profondeur (permanentes ou temporaires), aussi bien dans le cas de la salinité naturelle que de la salinité provoquée.

« Le facteur qui contribue le plus, et de façon la plus directe, à la formation des sols salins à l'époque actuelle est le processus d'évapotranspiration de l'eau de la nappe phréatique, lorsque l'écoulement ne s'effectue pas ou s'effectue au ralenti. Sous un climat aride les masses de sels accumulés dans les sols, les roches sédimentaires et les eaux souterraines peuvent subsister très longtemps. » (4)

Les sols salins se trouvent surtout dans les régions sèches, où les faibles pluies n'arrivent pas à éliminer les sels de la masse du sol. Ils se développent de préférence dans les parties basses du relief, plaines, bas-fonds, là où l'eau peut *s'accumuler et où la nappe souterraine se trouve généralement à faible distance de la surface.*

En ce qui concerne la formation des nappes d'eau salée responsable de la salinisation des sols dans les régions arides, on peut la résumer de la manière suivante. La répartition des eaux répond à une zonalité hydrochimique, selon le schéma ci-après : au fur et à mesure que l'on passe d'une zone humide à une zone moins humide, la teneur en sels augmente et l'on trouve successivement des eaux carbonatées, des eaux sulfatées, et enfin, des eaux chlorurées. Conformément à cette zonalité, les eaux douces de la zone aride sont associées aux sédiments proluviaux des contreforts de montagnes et aux sédiments alluviaux des grands fleuves qui drainent les régions humides. De plus, on peut rencontrer, dans les dunes et au voisinage des canaux d'irrigation, des lentilles d'eau douce flottant sur l'eau salée. Dans le reste de la partie septentrionale de la zone aride, les eaux sont, en général, salées.

Le processus d'accumulation des sels dans les eaux souterraines de la zone aride comprend les phases suivantes : alcalinisation du complexe salin des roches, échanges de cations, concentration de l'eau sous l'effet de l'évaporation, et précipitation des sels quand le seuil de solubilité est atteint. La précipitation des sels comprend, à son tour, trois étapes : il s'agit d'abord de carbonates, puis de sulfates, enfin de chlorures.

Dans le cadre d'études expérimentales du processus d'alcalinisation on constate, en observant la filtration de l'eau à travers la roche, que la salinisation comporte également plusieurs étapes. Au cours de la première apparaissent des eaux alcalines, qui se transforment en eaux saumâtres chargées de sulfates et de sodium. Puis la teneur en sels augmente, les eaux saumâtres deviennent des eaux salines, et enfin, une

sorte de saumure minéralisée contenant des chlorures et des sulfates. Dans les conditions naturelles les processus d'alcalinisation de ce genre s'accompagnent d'une réduction des sulfates : les sulfates disparaissent, et les eaux salines se transforment en saumure contenant des chlorures du sodium et du calcium.

Dans la partie méridionale des régions arides il existe aussi et des eaux douces et des eaux salines. Leur répartition géographique dépend de celle des structures géologiques ainsi que de la dynamique des écoulements souterrains. Les eaux douces se rencontrent, en général, dans les zones marginales des bassins artésiens et sur les bords des plateaux, où les eaux des strates profondes s'écoulent plus rapidement que dans les parties centrales des basins artésiens ; au centre de ces bassins on trouve des eaux salines.

La composition chimique des eaux profondes résulte d'actions complexes en cours depuis les époques géologiques. On distingue deux catégories d'eaux salines : les eaux sédimentaires, conservées dans les sédiments formés au cours des dernières époques de sédimentation, et celles qui proviennent de la métamorphisation des eaux infiltrées.

Quand on étudie les conditions dans lesquelles les eaux profondes se chargent de sels, il est indispensable de se rappeler que le mouvement de ces eaux n'est pas seulement dû à l'action de la gravité ; il peut aussi s'accomplir par diffusion, par osmose, par séparation des liquides selon leur densité propre et selon le mouvement de transition des particules résultant de l'autodiffusion. (7)

Le microrelief joue aussi un rôle dans le processus de la salinisation des sols ; les sels se concentrent surtout sur de petites buttes de quelques centimètres de hauteur, qui jouent le rôle de mèches aspirant l'eau et les sels qui y sont dissous.

3° Caractère des sels

a) *Solubilité*

Du point de vue de leur composition chimique les sels résultent de la combinaison d'un acide et d'une base avec élimination d'eau. Plusieurs sont solubles, d'autres non ou peu solubles. Or, on désigne, en agriculture et en pédologie, sous le nom de sels uniquement les sels facilement solubles, dont le taux dans les solutions du sol peut atteindre des valeurs élevées et, de ce fait, devenir nuisible à la croissance des plantes. La présence d'autres sels est, à cause de leur faible solubilité, mieux supportée par les végétaux.

Dans la pratique les sels solubles se présentent comme des combinaisons de trois bases (cations) : sodium (Na), magnésium (Mg), calcium (Ca), avec quatre acides (anions) : chlorures (Cl), sulfates (SO^4), carbonates (CO^3), bicarbonates (CO^3 H). Ce sont les :

Chlorures de Na,	de Mg	et de Ca		(ClNa, CL^2 Mg, Cl^2Ca) ;
Sulfates de	»	»	»	(SO^4Na^2, SO^4 Mg, SO^4Ca) ;
Bicarbonates	»	»	»	(CO^3 HNa, CO^3 H^2 Mg, CO^3 H^2 Ca);
Carbonates	»	»	»	CO^3 Na^2, CO^3 Mg, CO^3 Ca).

Sauf quelques rares exceptions, les sels de potassium (K) ne jouent pratiquement aucun rôle dans la salinité du sol.

La solubilité de ces sels est très variable, comme l'on peut en juger d'après les chiffres ci-dessous. (1)

Chlorure de	Na - 357 g/l,		bicarbonate de	Na - 80 g/l	
»	Mg - 820	»	»	Mg - ?	
»	Ca - 630	»	»	Ca - ?	
Sulfate de	Na - 88 g/l,		carbonate de	Na - 130	
»	Mg - ts	»	»	Mg - tps	
»	Ca - 2	»	»	Ca - 20 mg/l	

On voit, d'après ces chiffres, que tous les chlorures sont très solubles, les sulfates le sont moins et les carbonates alcalino-terreux (calcium et magnésium) sont pratiquement insolubles, ce qui explique d'ailleurs leur présence sous forme de calcaire et de dolomie, même dans les sols des régions relativement humides, où les sels solubles sont facilement lessivés de la masse du sol sous l'action des pluies. Par contre, les bicarbonates et le carbonate de sodium sont très solubles. L'existence de bicarbonates de calcium et de magnésium solubles est liée à la quantité de gaz carbonique présent dans les pores du sol. En perdant leur gaz carbonique les bicarbonates passent à l'état de carbonates peu solubles, qui précipitent. L'inclusion de carbonates de calcium et de magnésium ainsi que du sulfate de calcium parmi les sels solubles du sol, est motivée par le fait que la solubilité des sels en mélange est plus élevée que celle de chaque sel pris à part, si par suite de la réaction de double échange il se forme des sels peu solubles. De plus, sous l'action du gaz carbonique les carbonates alcalino-terreux peuvent passer à l'état de bicarbonates et *augmenter, de cette manière, le taux global* des sels solubles.

---

(1) Observations : s, soluble ; ts, très soluble ; tps, très peu soluble.
Mémento du Chimiste. Dunod, Paris.

Dans le sol humide, les sels se trouvent sous forme dissoute dans l'eau du sol. En se dissolvant ils se dissocient en bases (ou cations) portant des charges positives et en acides (ou anions) portant des charges négatives, dont la répartition dans l'eau du sol n'est pas uniforme. Les cations chargés positivement se rapprochent de la surface des particules colloïdales, minérales et organiques du sol (complexe absorbant) chargées négativement; ils peuvent même entrer en réaction, par échanges avec les bases fixées à leur surface. Les cations absorbés par les colloïdes du sol sont donc remplacés en *proportions équivalentes* dans les solutions du sol par des bases provenant du complexe absorbant, jusqu'à établissement de l'équilibre entre les bases du complexe et celles de la solution du sol.

Les anions chargés négativement son repoussés, par contre, aussi loin que possible de la surface des particules chargées elles aussi négativement (absorption « négative ») et se concentrent plutôt dans l'eau capillaire (voir plus loin).

b) *Mobilité des sels*

Les sels solubles se distinguent des autres composants du sol, du fait de leur solubilité, par leur grande mobilité. Ils se déplacent facilement dans la masse du sol, d'un horizon à l'autre, sous forme de solutions salines, tandis que les autres composants du sol, peu ou pas solubles, y compris calcaire, constituent l'ossature même du sol. C'est seulement dans les régions humides (froides ou chaudes) que le calcaire est lessivé (en partie ou en totalité) de la masse du sol.

Le déplacement des sels dans le profil est lié au mouvement de l'eau du sol, le phénomène de l'osmose étant peu important dans la terre, milieu discontinu. Les possibilités et les sens du déplacement de l'eau du sol dépendent à la fois des conditions climatiques, de la structure du sol, en particulier de la répartition des pores de différente nature dans le profil, et de la nature physique de l'eau.

Or, du point de vue de ses propriétés, l'eau du sol n'est pas uniforme dans toute sa masse. On peut distinguer, suivant son état physique :

— *L'eau fortement liée*, soumise à l'action des forces énormes s'exerçant à la surface des particules terreuses colloïdales et, de ce fait, fortement comprimée dans les pores très fins. *Elle n'est pas utilisable par les plantes :* cette catégorie d'eau, dont la limite supérieure correspond au point de flétrissement, comprend l'eau hygroscopique et l'eau pelliculaire ;

— *L'eau capillaire*, retenue dans les pores par des forces capillaires, est *utilisable par les plantes*. Son volume correspond à la différence entre la capacité de rétention et le point de flétrissement.

— *L'eau de gravité,* non retenue dans le sol, circule librement dans les pores grossiers et les fentes.

Ceci rappelé, étudions maintenant le mécanisme du déplacement de ces différentes catégories d'eau.

Une partie de *l'eau fortement liée* ne peut se déplacer que sous forme de vapeur (eau hygroscopique). De ce fait, son rôle dans le mouvement des sels dans le profil est nul. Par contre, une autre partie, l'eau pelliculaire, peut se déplacer sous forme de minces pellicules, de l'endroit plus humide vers l'endroit plus sec, en entraînant avec elle les sels. Ce mode de déplacement de l'eau du sol, très lent, ne peut avoir lieu que dans les régions sèches sans pluies importantes (autrement les sels seraient lessivés des horizons du sol au cours des pluies). C'est à ce mode de salinisation qu'on attribue la formation de certains sols et dépôts salés des steppes sèches à nappe profonde du Sud de la Russie.

Le déplacement de *l'eau capillaire,* non soumise à l'action de gravité, se produit dans les pores fins capillaires, au fur et à mesure de la perte d'eau par évaporation. Il n'est possible que si les capillaires sont alimentés par un réservoir d'eau libre, en l'occurence, dans le cas du sol, par la nappe d'eau souterraine proche de la surface, pérenne ou temporaire. La hauteur de la frange capillaire au-dessus du plan d'eau et sa vitesse de déplacement dépendent du diamètre des pores capillaires. Dans les pores assez larges, l'eau remonte rapidement mais à une hauteur assez faible (1,0 m environ dans les sols sableux à porosité grossière). Par contre, la vitesse de remontée est plus réduite et la hauteur de la frange capillaire plus grande dans les pores très fins (4-5 m dans les sols argileux à porosité fine). La remontée cesse pratiquement si la vitesse du dessèchement de la partie supérieure de la frange capillaire est trop rapide. Dans ce cas la perte d'eau par évaporation de cette partie du profil n'est pas compensée par la remontée capillaire, et l'humidification de la couche supérieure par la profondeur cesse.

Ce mécanisme entre de nouveau en action si, pour des raisons quelconques (pluies, irrigations), l'humidité de cette couche est amenée à nouveau à l'état capillaire.

Il en résulte que dans les sols qui restent constamment humides (entre la capacité de rétention et le point de flétrissement) les solutions salines peuvent donc se déplacer vers le haut sous l'effet de l'évaporation intense qui règne dans les régions sèches et humides, propices à la formation des sols salins.

L'évaporation, due à la chaleur et à la siccité atmosphérique, provoque, du fait de la proximité de la nappe, l'ascension de l'eau et des sels qui s'y trouvent dissous. En s'évaporant, l'eau laisse sur place les sels, qui s'accumulent ainsi dans des horizons.

La salinisation des sols par la remontée est un phénomène très répandu, responsable dans la plupart des cas de la salinité des terres (actuelle ou ancienne).

Elle peut avoir lieu, même dans le cas d'eaux souterraines douces, qui contiennent toujours en réalité une certaine quantité de sel, aussi faible soit-elle. La remontée continue des sels sous l'effet de la capillarité peut provoquer, à la longue, leur accumulation excessive dans les horizons supérieurs du sol.

L'eau de gravité

circule librement sous l'effet de la pesanteur dans les fissures et les pores grossiers du sol. Par contre, son déplacement dans les capillaires se fait lentement, même sous charge. La vitesse de la circulation de cette catégorie d'eau dépend de la charge et des caractères de la porosité (nature et répartition des pores). Sauf dans le cas des sols marécageux, la présence de cette catégorie d'eau dans le sol est due généralement aux pluies, et dans les régions sèches aux épandages et aux irrigations.

Si l'eau de pluie, en s'infiltrant dans le sol, dissout et entraîne les sels en profondeur, la question est plus complexe dans le cas de l'apport naturel (épandage des oueds) ou artificiel (irrigations), dont les eaux contiennent toujours des sels, quoique en proportions variables. Quelles sont donc, dans ce cas, les conditions et le sens de déplacement des sels, leur entraînement vers la profondeur ou leur accumulation dans les horizons du sol ? Pour répondre à cette question, il faut remarquer qu'il existe une relation entre la salinité du sol, celle de l'eau d'arrosage (naturel : épandage ; artificiel : irrigation) et leur régime, que nous avons présentée, Cherotzky et moi-même, sous forme d'une équation exponentielle :

$Y = \dfrac{S - K}{\left(\frac{Q}{R}\right)^X} + K$, où Y est la quantité de sel retenue dans le sol après X arrosages, K = la quantité-limite des sels susceptible d'être retenue dans le sol (elle est égale à $\dfrac{CQ}{\left(\frac{Q}{R} - 1\right)}$), Q = le volume d'eau d'arrosage,

R = le volume d'eau d'arrosage retenu dans le sol, C = la concentration des sels dans l'eau d'arrosage, X = le nombre d'arrosages.

Il résulte de l'étude de cette formule (voir tableau II et graphique I) que :

la quantité des sels, retenue dans le sol après X arrosages, tend vers une valeur limite K (asymptote Y = X), qui dépend de la teneur en sels des eaux d'arrosage et du rapport entre l'eau apportée et l'eau retenue (régime des arrosages) :

— pour C = 0 (eau douce) K devient égal à 0 et il se produit un lessivage continu des sels ;

— pour Q/R = I, la quantité des sels restés dans le sol après X arrosages pourrait être aussi grande que l'on voudrait, si toute l'eau d'arrosage est retenue dans le sol ;

— pour Q/R > I, c'est-à-dire si la quantité d'eau d'arrosage dépasse la capacité de rétention du sol, la quantité des sels retenue dans le sol dépend du rapport entre la salure initiale du sol S et la limite K ;

— pour S > K, la teneur en sels du sol diminue avec le nombre d'arrosages, il y a lessivage des sels ;

— pour S = K, la teneur en sels reste sans changement, la quantité des sels Y, retenue dans les sols après X arrosages, reste égale à la salure primitive du sol ;

— pour S < K, la teneur en sels augmente avec le nombre d'arrosages, il y a accumulation des sels dans le sol.

Il résulte aussi de cette étude que, sauf dans le cas d'eaux très fortement chargées, les possibilités de la salinisation du sol par l'apport d'eau à sa surface se réalisent surtout là où les eaux restent dans les horizons superficiels sans percoler, au moins en partie, en profondeur. Dans ce cas même les eaux peu chargées en sels peuvent provoquer à la longue, en s'évaporant, l'accumulation excessive des sels. C'est pourquoi les zones d'épandages des oueds sont souvent salées. Dans d'autres cas les sels apportés par les eaux d'arrosage dont le volume dépasse la capacité de rétention des horizons supérieurs partiellement lessivés au cours de la percolation ne s'y accumulent pas en proportions excessives. Il peut même arriver que les eaux saumâtres puissent lessiver les sols salins.

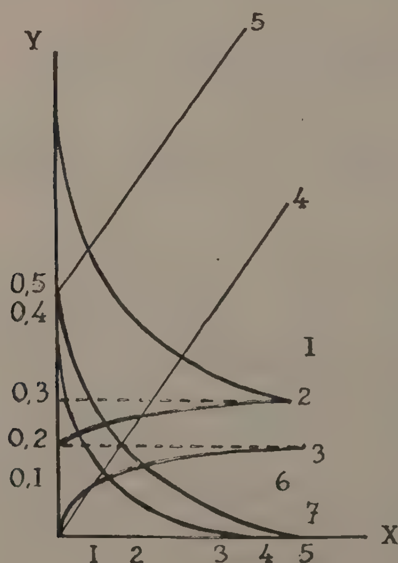
TABLEAU II

EXEMPLE DE LA SALINISATION ET DE LA DESSALINISATION

N	S	C	Q	R	Q/R	K
1	1,0	1,5	0,2	0,1	2	0,3
2	0,2	»	»	»	»	»
3	0,0	»	0,4	»	4	0,2
4	»	3	0,1	»	1	+
5	0,5	»	»	»	»	»
6	»	»	0,2	»	2	—
7	»	»	0,4	»	4	»

GRAPHIQUE I

COURBES DE LA SALINISATION
ET DE LA DESSALINISATION DU SOL



3° Action des sels sur le sol

Dans les pages précédentes nous avons indiqué que les sels du sol se trouvent en équilibre avec les bases échangeables du complexe absorbant. Dans le cas de l'apport de sel, soit par remontée capillaire, soit par

arrosage, leurs bases entrent en échange avec celles du complexe absorbant, jusqu'à l'établissement d'un nouvel équilibre entre elles, pour lequel Gapon donne la relation suivante :

$$\frac{Na\ X}{Ca\ X + Mg\ X} = K \sqrt{\frac{Na}{1/2\ (Ca + Mg)}}$$, soit, à gauche, la composition des bases échangeables du sol et, à droite, la composition cationique de l'eau d'arrosage.

Le coefficient K dépend de la nature du sol. Il résulte de cette équation, que *l'obtention de l'équilibre dépend des proportions relatives des bases, aussi bien dans le complexe que dans l'eau d'arrosage.*

Le complexe absorbant du sol « normal », à réaction neutre ou légèrement basique, bien agrégé, contient des proportions élevées de calcium (60-80 % de la totalité des bases) ; viennent ensuite, dans l'ordre décroissant, le magnésium, le sodium ou le potassium, et l'ammonium. Le remplacement du calcium, même partiellement, par le sodium change profondément la dynamique du complexe absorbant. Tant qu'il reste des sels en proportions notables dans les solutions du sol, le sol reste agrégé et sa réaction voisine de la neutralité. Après le départ des sels, pour que l'équilibre entre les bases du complexe et celles de la solution soit atteint, une partie des bases du complexe, et parmi elles le sodium, passent en solution, avec formation d'hydroxydes; la soude formée augmente le pH et, en se combinant avec le gaz carbonique, toujours présent dans le sol, donne le bicarbonate de sodium d'abord, le carbonate ensuite. L'augmentation du pH provoque la disparition de l'état agrégé du sol, la disparition étant due à la dispersion des colloïdes minéraux et humiques. En outre, en présence de carbonate de sodium se produit la précipitation, sous forme inassimilable, des éléments nutritifs ou utiles, tels que phosphore, fer, zinc, manganèse, etc. « Le sol devient alors un véritable solonetz, imperméable, mal aéré, visqueux, impossible à travailler, impropre à toute végétation, parce que les plantes y souffrent et y meurent, non d'intoxication caractérisée, mais d'asphyxie et de faim. » (Grillot)

Cette action néfaste du sodium commence à se manifester quand le taux du sodium dépasse 10-12 % de la totalité des bases échangeables (sols à alcalis, sol solontzeux). Elle devient prépondérante quand ce taux dépasse 25-30 % ; il se forme alors le véritable solonetz, sol impropre à toutes les cultures.

L'effet des doses élevées de magnésium échangeable paraît être comparable à celui du sodium, mais son action défavorable sur le sol et les plantes semble être atténuée par rapport à celle du sodium ; pour provo-

quer les mêmes effets le pourcentage du magnésium échangeable devrait être plus élevé que celui du sodium.

4° Sol et plantes

Il est admis généralement, qu'en faible quantité, les sels solubles qui font partie des solutions du sol agissent comme des stimulants ; mais, au fur et à mesure de l'augmentation de leur taux, ils deviennent nuisibles aux plantes. « La salinité, qui accroît la pression osmotique de la solution, peut exercer, de ce fait, une influence défavorable sur la végétation. Sous son effet la plante peut souffrir et mourir, non d'empoisonnement direct et brutal par les sels, mais en réalité de soif, en dépit du maintien de sa turgescence, qui peut se prolonger grâce à l'excès de sels contenus dans ses cellules, qui réduit la transpiration. » (1)

Or, les essais réalisés à Rabat durant quatre ans « dans les cases lysimétriques sur les irrigations à l'eau salée (1,5 g/l de NaCl) de trois types de sols : tirs (sol argileux lourd), sol brun (argilo-limoneux calcaire) et r'mel (sol sableux lessivé à un horizon argileux) ne montrent pas d'effets nocifs des sels sur les cultures du coton et du maïs. Au contraire, dans certaines cases à l'eau salée, on constate une augmentation des rendements par rapport aux cases arrosées à l'eau douce. » (8)

D'après les recherches faites, soit au laboratoire, soit au champ, il résulte qu'une teneur globale en sels de 5 o/oo dans le sol (chlorures et sulfates) se présente comme la valeur limite, au-dessus de laquelle la plupart des plantes cultivées ne se développent plus ou végètent médiocrement.

Toutefois, l'action déprimante des sels sur la récolte peut apparaître déjà, surtout pour les espèces sensibles, à partir de 1 o/oo. Mais le degré de résistance à l'action des sels n'est pas le même pour toutes les plantes. Certaines espèces sauvages s'adaptent même bien au milieu salin (plantes halophytes). Par contre, la tolérance des espèces cultivées est moindre, quoiqu'il existe toute une gamme de plantes, en allant des plus sensibles aux plus résistantes aux sels.

Différents auteurs ont, à plusieurs reprises, classé les plantes d'après leur résistance à l'action des sels, en se basant sur leur comportement suivant le degré de salinité du sol, exprimé, soit en poids total des sels ou du chlorure de sodium (le sel le plus répandu) pour un poids donné de sol, soit en mesurant la résistivité de l'extrait aqueux du sol. Toutefois, la valeur de ces classements n'est pas très rigoureuse, car la résistance des plantes à la salinité du sol dépend de plusieurs facteurs, dont les principaux sont : la nature du sol, les conditions climatiques, l'âge et l'état de la plante, la composition chimique des sels.

Dans la plupart des travaux de recherche faits à ce sujet, le degré de salinité du sol est exprimé en poids par rapport à la terre sèche. Or, le comportement de la plante par rapport aux sels et sa résistance dépendent surtout de la concentration des sels dans l'eau, exprimée en grammes par litre. D'une manière générale, les plantes supportent une concentration assez élevée des sels, quand on fait des essais en milieu liquide. Dans le sol, la concentration des solutions, pour une quantité de sels donnée, dépend de la quantité d'eau de rétention contenue dans le sol, en faisant abstraction de l'eau de gravité, dont la présence est fugace et passagère, si le drainage du sol est bon.

Or, la capacité de rétention du sol pour l'eau varie, suivant sa constitution, dans des limites assez larges. Ainsi, en supposant, pour la simplicité de l'exposé, que les sels se répartissent uniformément dans toute la masse du sol et de l'eau, la concentration en sels de la solution du sol, pour un sol contenant 1 g de sels par kilo de terre sèche, sera, suivant la capacité de rétention :

10 g/l	pour un sol	sableux,	ayant la capacité de rétention	de	10 %
5	—	limoneux		—	20 %
3	—	argileux		—	30 %

Il en résulte que le même taux de sels sera dangereux dans un sol sableux à faible capacité de rétention, et bien toléré dans un sol argileux à capacité de rétention élevée.

Mais l'état hydrique du sol varie constamment tout le long de la période de végétation, même pendant la saison pluvieuse. L'humidité du sol peut descendre, par suite de l'évaporation et de la transpiration des plantes, même au-dessous du point de flétrissement, et remonter après les pluies et les irrigations, jusqu'à la capacité de rétention. Il s'ensuit que la concentration des sels de l'eau subit des changements en fonction de l'état hydrique du sol. Ainsi, si dans l'exemple précédent l'humidité du sol diminue de moitié, la concentration de la solution du sol augmentera dans les proportions suivantes :

— Pour les sols sableux, à humidité égale à 5 %, la concentration sera de 20 g/l,

— Pour les sols limoneux, à humidité égale à 10 %, la concentration sera de 10 g/l,

— Pour les sols argileux à humidité égale à 15 %, la concentration sera égale à 6-7 g/l.

Il résulte de cet exemple qu'une plante qui s'adapte bien à une salinité de 1 ‰ dans un sol limoneux peut être incapable de supporter

une concentration identique dans un sol sableux ou même argileux, lorsque sous l'effet de l'évaporation le degré d'humidité s'abaisse excessivement. C'est pourquoi dans la pratique ou dans les essais au champ la tolérance des plantes à l'égard des sels est moins élevée que dans les essais faits dans le milieu liquide, où les concentrations restent sans changement au cours de l'expérience.

Ajoutons encore que les caractères hydriques du sol, sa capacité de rétention et son point de flétrissement peuvent varier d'une manière sensible d'un horizon à l'autre, surtout dans les profils bien différenciés ou dans les profils à composition granulométrique variable.

Le climat du lieu, et en particulier le degré d'humidité de l'air, influe sur la tolérance des plantes à l'égard des sels. Sous un climat chaud et sec, où la transpiration et l'évaporation sont plus élevées que sous un climat plus froid et plus humide, la tolérance des plantes à l'égard des sels est moins grande que sous un climat plus humide.

Enfin, l'état de la plante et son âge sont des facteurs importants de la résistance des plantes aux sels. En effet, les jeunes plantules sont plus sensibles à leurs effets nocifs que les plantes adultes, et les plantes souffreteuses résistent moins bien à leur action néfaste que les plantes bien portantes. De ce point de vue, les conditions du milieu — adaptation de la plante au type du sol, état physique de ce dernier et sa richesse en éléments nutritifs — jouent un rôle très important dans la tolérance des plantes à l'égard des sels.

Les facteurs qui conditionnent cette tolérance du point de vue quantitatif sont : le degré de salinité du sol, les caractères physico-chimiques de ce dernier, les conditions climatiques, l'état et l'âge de la plante.

Mais la composition chimique des sels joue aussi un rôle important. En effet, la toxicité spécifique des composants des sels est variable. Sans entrer dans les détails de cette question, on peut remarquer que tous les chlorures et tous les sels du sodium sont toxiques. Parmi les sulfates, seul le sulfate de calcium (gypse) et parmi les carbonates, les carbonates de calcium et de magnésium, ne paraissent pas extrêmement nuisibles. Toutefois, la présence simultanée de plusieurs sels de nature chimique différente dans l'eau du sol paraît abaisser leur toxicité respective. Ce phénomène d'antagonisme des sels est très important dans l'appréciation de la tolérance des plantes à l'égard de la salinité du sol.

Toutes les autres conditions étant similaires (même climat, même type de sols, même plante), les espèces cultivées se comportent différemment suivant la nature chimique des sols. Le degré de tolérance est plus élevé dans les sols à salure mixte (chlorures et sulfates) que dans les

sols à salinité uniquement chlorurée ou sulfatée. La composition chimique de la salinité n'est pas toujours constante. Elle peut varier quand les sels se déplacent d'un horizon à l'autre, ou quand ils sont apportés au sol (soit par l'arrosage, soit par la remontée capillaire à partir de la nappe salée proche de la surface), par suite des réactions d'échanges entre les bases solubles de l'eau et celles du complexe absorbant ou des carbonates insolubles de calcium et de magnésium. Le changement de l'état hydrique du sol peut provoquer aussi des variations dans la nature de la salinité. En effet, l'abaissement du taux d'humidité est suivi de l'augmentation de la concentration des sels dans la solution du sol. Si l'un des composants de la salinité atteint à ce moment sa limite de solubilité, il peut précipiter. De ce fait, la nature de la salinité serait changée. Le phénomène inverse peut se produire au cours de l'augmentation du taux de l'humidité du sol, laquelle est suivie de la dissolution des sels précipités au cours du dessèchement. Les variations de la pression du gaz carbonique, liées, soit à sa production dans le sol au cours du cycle végétatif, soit aux variations du régime thermique, provoquent, elles aussi, les variations de la solubilité des carbonates de calcium et de magnésium.

« Jusqu'ici nous avons surtout examiné les rapports entre la teneur en sels du sol et le développement des plantes qui y poussent. Mais cela ne suffit pas. Nous ne pouvons comprendre l'économie hydrique de ces plantes que si nous connaissons la concentration en sels dans les plantes elles-mêmes, car ce sont seulement les sels absorbés par les plantes et emmagasinés dans leurs cellules (et non ceux du sol) qui ont un effet sur le protoplasma et sur les fonctions vitales. Les chlorures sont particulièrement importants à cet égard, car les plantes les absorbent plus facilement que les sulfates ; en outre, ils ne participent pas au métabolisme mais se trouvent sous forme d'ions dans les vacuoles, souvent avec une concentration très forte. » (9)

« *La résistance spécifique du protoplasma aux sels est donc un facteur primordial et le plus important de la tolérance des plantes à l'égard de la salinité.* Chez les halophytes, cette résistance est, en général bien plus élevée que chez les glycophytes ; elle est toutefois sujette à des variations, et celles-ci déterminent la répartition des divers halophytes entre les habitats présentant des degrés différents de salinité. »

« Les besoins en eau des plantes poussant sur sol salin dépendent, eux aussi, de la résistance spécifique du protoplasma aux sels. Chez toutes les plantes, les sels accumulés ont tendance à prendre la place des substances organiques qui jouent un rôle dans le phénomène de l'osmose. Ainsi est-ce d'eux que dépend cette force d'aspiration qui, seule, détermine la quantité d'eau que la plante retire du sol. Les plantes dont le

protoplasma présente une résistance élevée aux sels sont donc capables d'une pression osmotique plus forte ; elles sont aussi mieux en mesure de supporter une augmentation passive de cette pression due à la perte d'eau par transpiration, qui équivaut à une augmentation de la concentration interne en sels. »

« Pour les raisons susmentionnées il arrive souvent que les plantes dont le protoplasma a une faible résistance aux sels (par exemple les plantes cultivées) ne peuvent pas, en temps de sécheresse, s'adapter grâce au jeu du mécanisme de l'osmose. Elles s'étiolent alors, car l'absorption de substances nutritives et l'assimilation de CO^2 sont également entravées par le manque d'eau. »

« La salinité a donc deux conséquences dommageables : d'une part, l'empoisonnement par les sels, qui provoque la décoloration et le flétrissement prématuré des plantes, d'autre part, lè manque d'eau, qui entraîne le rabougrissement. Les deux conséquences apparaissent souvent à la fois. » (10)

5° Utilisation et amélioration des sols salins

L'accumulation des sels dans le sol présente un élément défavorable pour la croissance normale des plantes. Une question se pose alors : comment utiliser et améliorer les terres qui contiennent des sels ou qui risquent d'être salinisées, soit par suite de la remontée de la nappe souterraine, soit par l'irrigation à l'eau saumâtre ?

a) *Classement des sols salins*

La classification des sols salins, d'après leur taux global de sels, présente beaucoup de difficultés à cause de leur mobilité, d'une part, et de l'action spécifique des sels et de leurs mélanges sur les plantes, d'autre part. Il est aussi important de ne pas perdre de vue que l'action néfaste de la salinité ne se limite pas seulement aux rendements de la récolte ; elle atteint aussi sa qualité. Enfin, les conditions climatiques du lieu influent, elles aussi, sur la tolérance des plantes à l'égard des sels.

A titre indicatif on peut considérer toutefois comme :

— *sols non-salins,* sols dont le taux global de sels ne dépasse pas 1 ‰ (toutes les cultures sont possibles dans ces sols) ;
— *Sols sub-salins* (ou moyennement salins), sols dont le taux de sels varie entre 1 et 5 ‰ (la plupart des cultures sont possibles suivant le degré et la nature de la salinité, sauf des espèces sensibles) ;

— *Sols salins,* sols dont ce taux dépasse 5 $^{o}/_{oo}$ (seules les cultures résistantes aux sels peuvent se développer dans ce milieu).

On donne le nom de *solontchak* au sol dans lequel les sels s'accumulent à la surface, pour former une croûte saline. Il est nécessaire d'indiquer aussi la nature de la salinité suivant la prédominance des anions (chlorurée, sulfatée, carbonatée) et des cations (sodique, magnésienne, calcique).

b) *Amélioration des sols salins*

L'amélioration radicale des sols salins consiste en l'élimination des sels par un lavage du sol. Les volumes d'eau de lavage doivent dépasser dans ces terres la capacité de rétention du sol, pour provoquer la percolation de l'excès d'eau d'arrosage et entraîner de cette manière les sels en profondeur, sans qu'ils puissent remonter de nouveau vers la surface. Cette pratique n'est possible que si les conditions hydrogéologiques permettent l'évacuation rapide des eaux d'infiltration. Autrement, l'accumulation des eaux en profondeur et l'exhaussement consécutif du plan d'eau rendraient aléatoire le dessalage des horizons supérieurs du sol, en permettant la remontée, par capillarité, des eaux de la nappe et des sels qui pourraient être dissous.

Notons à ce sujet que, «sur trois méthodes qui peuvent être employées pour résoudre le problème de la salinité dans la zone aride :

adaptation,
déminéralisation et
action sur le cycle hydrologique,

la dernière est celle qui doit avoir la priorité. En effet, en ce qui concerne la mise en valeur des terres arides, l'adaptation des plantes et des autres organismes vivants au milieu salin et les techniques de purification des eaux salines représentent, par rapport aux possibilités qu'offre l'action sur le cycle hydrologique, des tâches auxiliaires.

Etant donné que le sol et le sous-sol (et notamment les réserves d'eaux souterraines) constituent les principales sources directes de minéralisation, l'action sur le cycle hydrologique consistera à régler et à orienter la distribution des eaux, de manière à limiter dans le temps et dans l'espace les contacts de l'eau douce avec les milieux salins. » (12)

Le lavage des sols salins pose toujours les problèmes de la solonetzation éventuelle du sol par absorption du sodium par le complexe, comme nous l'avons indiqué dans les pages précédentes ; les manifestations dues au sodium échangeable apparaissent lors de la disparition des sels au

cours du lavage dans les sols non-calcaires. Il est donc nécessaire de prévoir l'apport du gypse avant le lavage, pour remplacer le sodium échangeable par le calcium, afin que le complexe puisse être saturé de cet élément lors du lavage. L'apport du calcaire ou de la chaux agricole est toujours déconseillé, à cause de la formation possible de carbonate de sodium aux dépens du calcaire et du sodium échangeable, ce dont nous avons vu les effets néfastes sur le sol et les plantes. Les produits d'échange doivent être obligatoirement éliminés de la masse du sol par des lavages abondants. Dans les sols à calcaire fin, où le carbonate de calcium peut empêcher l'absorption du sodium, le plâtrage ne paraît pas nécessaire. Toutefois, dans certains cas l'apport du soufre peut être utile par la formation de sulfate de calcium résultant de l'oxydation du soufre avec l'acide sulfurique, qui, en attaquant le calcaire, donnerait naissance au sulfate de calcium, plus soluble et plus actif de ce fait.

c) *Utilisation des sols salins*

Si les conditions locales ne permettent pas d'abaisser le taux de sel dans le sol, il est possible d'utiliser toutefois les sols salins, en pratiquant des cultures adaptées à ce milieu. Ce problème pourrait être résolu, soit par le choix de plantes résistantes à la salinité donnée du sol, soit par la sélection de variétés possédant une plus grande tolérance à l'égard des sels.

Il importe, dans ce cas, « de pousser les opérations de sélection et de culture des semences, de façon à obtenir des variétés résistantes et, pour cela, de recourir aux méthodes, tant microscopiques que macroscopiques, de détermination de cette résistance. »

« Pour obtenir des variétés résistantes, il convient d'appliquer largement le procédé du croisement, en utilisant des plantes diversement adaptées aux sols salins. »

« Pour accroître la résistance des plantes dans un sol modérément chloruré, il est nécessaire, avant de semer, de traiter les semences à l'aide de solutions salines. » (11)

Le régime d'irrigation de ce sol doit être établi de telle façon que celui-ci reste constamment humide sans provoquer la remontée capillaire des sels vers la surface. Les irrigations devront être fréquentes et abondantes, si les conditions hydrogéologiques permettent l'écoulement des eaux excédentaires nécessaires pour le maintien du degré de salinité au niveau désiré.

Il faut se rappeler que « plus la résistance protoplasmique aux sels est faible, plus le *bilan hydrique spécifique de l'espèce* présente de l'im-

portance du point de vue de la tolérance de celle-ci à l'égard de la salinité. Lorsque le déficit de saturation résultant d'une transpiration excessive et d'une régulation imparfaite des stomates est élevé, il provoque une augmentation temporaire de la concentration de sels dans les cellules. En revanche, un régime hydrique stable provoque rarement le flétrissement et peut améliorer la tolérance générale à la salinité, particulièrement chez les espèces dont le protoplasma n'a pas une très haute résistance aux sels. » (10)

Suivant la nature, d'une part, du complexe absorbant et, d'autre part, des sels (soit du sol, soit des eaux d'irrigation), on peut prévoir l'apport de sulfate de calcium pour empêcher l'absorption de sodium par le complexe.

Cet apport ne se justifie pas si on l'applique dans le but de corriger uniquement la nature de la salinité du sol au cas où sa composition basique est favorable, car l'apport du sel, même peu soluble, peut provoquer l'accroissement dangereux du taux global des sels, donc du degré de salinisation.

Dans le cas d'irrigation à l'eau saumâtre les volumes d'arrosage doivent être calculés de façon à provoquer le lavage du sol au cours de l'irrigation.

Il arrive parfois, malgré toutes les précautions prises pour empêcher l'accumulation des sels au cours de la saison chaude et sèche, que celle-ci se produise quand même. Il faut considérer alors deux cas. Les pluies d'hiver peuvent parfois abaisser le degré de salinité des sols au cours de la saison froide et humide ; aucune intervention humaine n'est alors nécessaire. Dans le cas d'insuffisance des pluies pour provoquer l'abaissement du degré de salinité du sol il devient, par contre, nécessaire de recourir aux lavages d'hiver, saison où les eaux d'arrosage deviennent moins chargées en sels.

RESUME

Il résulte de cet exposé que le problème de la salinité du sol est un problème complexe. Les sels sont caractérisés par leur solubilité et par leur mobilité. Leur taux peut varier au cours de l'année. Il s'abaisse sous l'effet de l'apport de l'eau douce due aux pluies ou aux irrigations. La remontée capillaire à partir d'un plan d'eau libre proche de la surface du sol provoque l'accumulation des sels dans les horizons supérieurs. Il existe une relation entre la salinité du sol, celle de l'eau d'arrosage et le

nombre d'irrigations. Les bases des sels dissous dans l'eau sont en équilibre avec celles du complexe absorbant. L'absorption du sodium par le sol provoque la formation du solonetz, sol impropre à la culture. L'aptitude des plantes à se développer en milieu salin dépend de leur tolérance spécifique à l'égard des sels. La composition chimique des sels joue un rôle important dans la résistance des plantes ; elle est en relation avec le phénomène connu sous le nom d'antagonisme des sels.

L'utilisation et l'amélioration des sols salins nécessitent la prise d'un certain nombre de mesures, parmi lesquelles il faut citer le maintien du calcium à l'état échangeable et la discipline des irrigations, car la présence du plan d'eau à faible profondeur est la cause principale de la salinité des sols.

G. Bryssine

BIBLIOGRAPHIE

1. G. Grillot. — Les problèmes biologiques relatifs aux plantes tolérant l'eau salée ou saumâtre et à l'utilisation d'une telle eau pour l'irrigation. *In* Utilisation des eaux salines. Recherches sur la zone aride IV. UNESCO, 1957, pp. 9-35.

2. N. Rozov. — La Pédologie appliquée à l'amélioration des sols. Moscou, 1936 (en russe), pp. 494.

3. G. Bryssine. — La salinité des sols et ses problèmes. Causerie faite au CETA de Sidi Slimane-Sidi Kacem, février 1959 (reproduit dans le présent ouvrage).

4. V. A. Kovda. — Principes de la théorie et de la pratique de l'amendement et de l'utilisation des sols salins dans les régions arides (en anglais).

5. Projet majeur relatif aux recherches scientifiques sur les terres arides. L'UNESCO et les recherches sur les zones arides.

6. G. V. Bogomolov. — Conditions de la formation d'eau douce sous pression dans certaines zones désertiques d'Afrique du Nord, d'U.R.S.S. et d'Asie Sud-Est (en anglais).

7. A. I. Siline-Bektchourine. — La formation des nappes d'eau saline dans les régions arides (en anglais).

8. G. Bryssine. — Essais sur l'irrigation à l'eau saumâtre réalisés au Maroc. Colloque UNESCO-IRAN sur les problèmes de la salinité des sols des régions arides, Téhéran, 1958 (reproduit dans le présent ouvrage).

9 H. Walter. — L'adaptation des plantes aux eaux salines (en anglais).

10. G. Repp. — Principes fondamentaux de la tolérance des plantes à la salinité (en anglais).

11. P. A. Henckel et B. P. Stroganov. — Physiologie des plantes consommant de l'eau saline (en anglais).

12. M. A. Loehnberg. — Diminution de la salinité par modification du cycle hydrologique (en anglais).

13. G. Plaisance et A. Cailleux. — Dictionnaire des sols.

ESSAIS SUR L'IRRIGATION A L'EAU SAUMATRE REALISES AU MAROC *

Le problème de l'irrigation à l'eau saumâtre s'est posé avec acuité au Maroc lors de la mise en service du périmètre irrigué des Beni Amir, situé dans la cuvette du Tadla, à 200 km au sud de Rabat.

Eaux d'irrigation. — En effet les eaux de l'oued Oum-er-Rebia, utilisées pour les irrigations de ce périmètre, contiennent des doses notables de sels. La teneur en chlorure (anion prédominant), exprimée en NaCl (en g/l) varie à la fois suivant les saisons et d'une année à l'autre. Elle décroit pendant la période hivernale (froide et humide) et augmente pendant la période estivale (chaude et sèche), la moyenne oscillant autour de 0,8 o/oo. C'est au printemps que la teneur en sels des eaux devient la plus basse (autour de 0,2 - 0,3 o/oo) ; elle croit ensuite en été pour atteindre son maximum en automne (autour de 1,2 - 1,5 o/oo) et diminue de nouveau en hiver. D'une manière générale le rapport Na/Ca est supérieur à 1. Le taux des carbonates de calcium et de magnésium varie peu au cours de l'année. Le taux des sulfates est faible.

Sols. — On peut diviser les sols des Béni Amir en deux groupes suivant leur épaisseur (1) :

— sols bruns et châtains-rouges, à croûte (stalactiforme, nodulaire ou lamellaire) de faible épaisseur, qui occupent les pourtours ;

— et sols bruns, profonds, sur limon calcaire généralement encroûté, parfois à croûte graveleuse, qui couvrent le centre de la plaine.

Voici à titre d'exemple la composition physique de ces sols (%) :

TABLEAU I

HORIZONS		ARGILE	LIMON	SABLE FIN	SABLE GROSSIER	CO^3Ca
	B-29 : Sol châtain rouge à croûte stalactiforme					
0-10	sol	29	9	41	2	19
10-30	sol	32	10	36	1	21
30-120	croûte stalactiforme	25	7	18	t	50
120-160	limon	20	8	10	t	62
	B-236 : Sol brun steppique profond à croûte graveleuse					
0-10	sol	29	25	27	2	15
10-30	sol	29	25	28	2	15
30-60	croûte gravel.	31	17	21	2	30
60-110	limon	22	17	12	1	46
110-150	encroûté	28	19	14	1	34

*) Communication présentée au Colloque UNESCO sur les problèmes de la salinité dans les régions arides, Téhéran, 11-15 octobre 1958.

Il faut remarquer que dans le sol à croûte B-29 le calcaire des horizons terreux se trouve sous forme assez grossière (pointes calcaires), tandis que dans le sol profond B-236 il est très fin. Le complexe absorbant de ces sols est bien saturé en calcium, le taux de sodium échangeable étant très faible (inférieur à 2 %). Par contre les horizons profonds sont riches en magnésium échangeable (au-dessus de 40 % de la capacité d'échange des bases). A l'origine ces sols n'étaient pas salés.

Climat. — La région des Beni Amir jouit du climat méditerranéen méridional (hiver pluvieux, été sec), dans sa variété sèche. Ce climat est nettement semi-aride, et son aridité semble s'accentuer en allant vers l'ouest. A Dar Ould Zidouh (voir les données climatiques), situé au sud-ouest du périmètre, l'indice pluviométrique annuel de Lang s'abaisse à 14,5 pour une pluviométrie de 293 mm ; les pluies tombent en majeure partie entre novembre et mars, à une époque où la température reste douce. L'été est très sec (en dehors de quelques orages incertains) et particulièrement chaud.

TABLEAU II

DONNEES CLIMATIQUES (1930)

MOYENNES ANNUELLES			SAISON HUMIDE		
Pluies	T. moy.	P/T	Durée	Mois	P/T
293	20,2	14,5	5	IX-III	35

Problèmes à résoudre. — Ces conditions du milieu (la faible épaisseur des terres, leur nature, la salure des eaux de l'Oum-er-Rebia, la chaleur et la sécheresse de l'été) ont motivé les recherches que nous avons entreprises à différentes reprises et qui avaient pour buts principaux et immédiats de déterminer :

1) Si les sels solubles apportés par l'eau d'irrigation s'accumulent dans le sol, c'est-à-dire si l'on doit craindre ou non la salinisation progressive de ces terres.

2) Dans le cas où les sels se seraient effectivement accumulés, si les pluies d'hiver les éliminent au cours des mois d'hiver.

3) Si un échange est possible entre les bases du sol et celles de l'eau apportée et si, en particulier, il peut y avoir fixation par le sol du sodium contenu dans cette eau, c'est-à-dire, s'il existe des risques de solonetzation de ces sols et si, dans ce cas, le calcium de ces sols calcaires jouera ou non un rôle protecteur.

DESCRIPTION DES ESSAIS

I. Essais au laboratoire

La première série d'essais a été réalisée au laboratoire, il y a 18 ans (en 1940-41), sur sol brun châtain à croûte stalactiforme, dans des buses de 40 cm de profondeur, et sur place aux Béni Amir (2). Dans les essais au laboratoire les irrigations à l'eau salée (dont la salure a été ramenée à 1,5 g de NaCl par litre) alternaient avec les arrosages à l'eau distillée qui représentaient les pluies d'hiver, en vue d'établir les possibilités du lavage hivernal. Dans tous ces essais les volumes d'eau d'irrigation dépassaient largement la capacité de rétention du sol pour l'eau. Au cours de l'expérience nous faisions varier les volumes et la salure de l'eau d'irrigation. Tous nos essais au laboratoire ont été faits avec de l'eau dont la salure restait élevée au cours des opérations. Les détails de cette expérience sont exposés dans notre « Etude Expérimentale de l'irrigation du sol des Beni Amir » (2). Nous reproduisons ci-dessous les conclusions de cette étude, qui sont les suivantes :

a) En ce qui concerne les irrigations elles-mêmes, l'arrosage à l'eau salée, contenant 1,5 g/l de NaCl, ne contribue pas, dans les conditions de l'expérience, à la rétention massive des sels. Par contre, les sels restés dans le sol après chaque arrosage sont susceptibles de remonter vers la surface et de s'accumuler dans les horizons supérieurs.

b) Au cours de la saison pluvieuse les sols sont susceptibles de subir un lavage plus ou moins complet.

c) Les sels de l'eau d'irrigation agissent sur le sol en provoquant l'augmentation de la basicité, du pH, l'apparition de la turbidité de l'eau de percolation, dues à l'absorption (au moins partielle) du sodium.

Le calcium du calcaire n'intervient dans ces sols que dans une faible mesure ; par contre l'action protectrice du calcium de l'eau est beaucoup plus marquée. C'est surtout au cours du lavage que se produit la mise en suspension de l'argile et son entraînement.

d) Les irrigations telles qu'on les pratique actuellement aux Beni Amir semblent relever le niveau de la nappe phréatique au cours de l'été, car cette remontée coïncide avec le début de la saison des irrigations. La salure de la nappe augmente au cours de l'été et atteint son maximum au cours de l'hiver, probablement par le fait du lavage des sols irrigués ; puis la salure s'abaisse au printemps.

En comparant les résultats trouvés au laboratoire à ceux observés sur place, on note qu'en général ils sont concordants. Mais l'ampleur du phénomène est différente suivant qu'on a affaire à des petites buses ou à des parcelles d'essais qui ont une superficie plus importante. Les chiffres

trouvés au laboratoire montrent la possibilité de l'accumulation des sels dans les horizons supérieurs. Mais le taux de chlorures retenus dans les terres des buses est faible, tandis que les déterminations faites sur place montrent des doses plus élevées. Ceci tient à ce que dans les Beni-Amir (où l'air est très sec) l'évaporation a été plus importante que dans les essais au laboratoire à Rabat.

En ce qui concerne le lavage des terres par les pluies, les résultats sont concordants. L'étude de la salure de la nappe laisse supposer que le lessivage est plus lent dans la nature que dans les buses.

En outre, les trois facteurs suivants influent sur la dynamique des sels dans le sol :

a) Nature des eaux d'irrigation : plus les eaux sont salées, plus il reste de sels dans le sol ;

b) Volume et fréquence des irrigations : le lavage partiel des sels se fait plus énergiquement quand le volume est plus grand ; en outre, plus les irrigations sont fréquentes, plus le sol est lavé rapidement et plus il est facile de maintenir la salure basse ;

c) Quantité d'eau retenue dans le sol après le lavage (autrement dit après les pluies hivernales), qui diminuerait la concentration en sels des eaux d'irrigations.

II. Etude de la relation entre la salure des sols, celle de l'eau d'arrosage et le régime des irrigations

Les résultats obtenus au cours de cette étude expérimentale ont incité M. Cherotzky et moi-même à rechercher une relation entre la salure du sol, celle de l'eau d'arrosage et le régime des irrigations (3). Cette relation se présente sous forme d'une formule qui montre que si le drainage du sol est assuré, la teneur en sels du sol tend vers une valeur-limite K, inférieure à la quantité totale des sels apportés par les eaux d'arrosage au cours des irrigations. La valeur chiffrée de cette limite dépend à la fois des propriétés hydriques du sol, de la salure des eaux d'irrigation et du rapport entre le volume d'eau d'arrosage et le volume d'eau retenu dans le sol après chaque irrigation. Plus ce rapport se rapproche de 1, c'est-à-dire plus le volume d'eau d'arrosage se rapproche du volume correspondant à la capacité de rétention, plus le salage du sol sera élevé. Il résulte aussi de cette formule que les irrigations massives des sols salés avec une eau saumâtre peuvent même abaisser dans une proportion notable la salure initiale du sol.

III. Etudes réalisées sur place aux Beni Amir

La nappe des Beni Amir était généralement profonde avant la mise en eau du périmètre. L'irrigation de la partie est des Beni Amir a pro-

voqué une alimentation de la nappe, supérieure aux possibilités d'évacuation et par suite sa remontée, dangereuse dans le périmètre lui-même ainsi qu'à l'ouest et en aval du périmètre. Des drains ont été creusés pour évacuer, imparfaitement d'ailleurs, les eaux souterraines excédentaires. Malgré la disparition de certaines résurgences à la suite de ces travaux de drainage, certains accidents de végétation dus à la salure ont été constatés ces dernières années. Au début de 1955 le Centre de Recherches Agronomiques de Rabat a repris, sur la demande de l'Administration, les recherches aux Beni Amir sur la dynamique des sels (4-5) :

1° Etude de l'évolution de la salure, en prélevant périodiquement (quatre fois par an) des échantillons de terres en seize stations d'étude sur des soles différentes en chaque station, et en déterminant sur place l'humidité du sol au moment du prélèvement, ainsi que les taux des chlorures, des sulfates et des carbonates.

2° Prélèvements et analyses d'eaux d'irrigation et d'eaux de drainage en différents points du périmètre ;

3° Prélèvements (une fois par an) de terres de la couche arable en vue de leur analyse détaillée (caractères physiques, nature du complexe absorbant, matière organique).

Cette étude nous a amené aux conclusions suivantes :

a) Les recherches sur place sur la dynamique des sels et sur l'évolution des sols aux Beni Amir sous l'effet des irrigations ont confirmé pleinement les conclusions exposées plus haut de notre étude expérimentale réalisée en 1940-41 ainsi que les craintes qui y furent exprimées, à savoir : la possibilité de la remontée de la nappe (soit par suite de pertes d'eau dans les canaux, soit à cause des irrigations massives), suivie du salage des sols.

b) Les sols du périmètre irrigué des Beni Amir contiennent des proportions notables de chlorures : en moyenne leur taux (exprimé en NaCl) dépasse largement 1 o/oo. La salure augmente et devient même un obstacle pour les cultures dans les zones où la nappe, malgré les travaux de drainage, reste près de la surface du sol. Dans ces zones, où elle dépasse largement 2 o/oo, les horizons du sol au-dessus du plan d'eau restent constamment humides au cours de l'été, même dans les parcelles non-irriguées, ce qui facilite la remontée des sels et leur accumulation dans la couche arable.

c) La remontée des sels et leur accumulation dans les horizons supérieurs ont lieu aussi bien dans les sols non-irrigués (jachères) ou irrigués au printemps seulement (céréales, légumineuses) que dans les sols irrigués en été (coton), exception faite des luzernières, où la salure des sols se maintient à un niveau relativement bas.

TABL

RENDEMENT

TYPE DU SOL	N° DES CASES	PRATIQUE DES IRRIGATIONS
Sol brun des Beni Amir	1	Non-irriguée
	2	Irriguée à l'eau douce
	4	Irriguée à l'eau salée - dose 1
	3	id - dose 2
	6	id - dose 1 + gypse
	5	id - dose 2 + gypse
	Moyenne des cases irriguées à l'eau salée	
Tirs de Sidi Slimane (sol argileux lourd hydromorphe)	1	Non-irriguée
	2	Irriguée à l'eau douce
	4	Irriguée à l'eau salée - dose 1
	3	id - dose 2
	6	id - dose 1 + gypse
	5	id - dose 2 + gypse
	Moyenne des cases irriguées à l'eau salée	
R'mel de Rabat (sol sableux lessivé, fortement argileux en profondeur)	1	Non-irriguée
	2	Irriguées à l'eau douce
	4	Irriguée à l'eau salée - dose 1
	3	id - dose 2
	6	id - dose 1 + gypse
	5	id - dose 2 + gypse
	Moyenne des cases irriguées à l'eau salée	

COTON ET DU MAIS

COTON				MAIS			
1955		1957		1956		1958	
qx/ha	% de 2	qx/ha	% de 2	qx/ha	% de 2	qx/ha	% de 2
11	39	9	33	47	67	48	78
28	**100**	**27**	**100**	**70**	**100**	**62**	**100**
30	107	38	141	90	129	72	116
31	111	40	148	77	110	81	131
27	96	32	129	97	138	83	134
30	107	46	171	79	113	74	120
29	**105**	**39**	**145**	**86**	**122**	**78**	**125**
15	54	8	19	55	63	51	66
28	**100**	**41**	**100**	**104**	**100**	**77**	**100**
31	115	43	105	103	99	62	80
39	139	34	83	100	96	82	107
32	114	45	110	105	101	86	112
32	114	52	127	118	113	99	129
34	**120**	**44**	**106**	**107**	**102**	**82**	**107**
18	48	9	56	18	29	16	49
23	**100**	**16**	**100**	**60**	**100**	**33**	**100**
22	96	18	113	61	102	34	103
18	78	21	131	50	83	29	88
20	87	25	156	50	83	37	112
22	96	21	131	54	90	35	106
21	**89**	**21**	**133**	**54**	**90**	**34**	**105**

d) Aucun salage excessif n'a été observé dans les zones où la nappe est profonde, aussi bien dans les sols irrigués que dans les sols en jachère non-irriguée.

e) En ce qui concerne les variations de la salure au cours de l'année, il existe une différence de comportement entre les sols salés à nappe superficielle et les sols peu salés à nappe profonde, quelle que soit la culture.

Dans les sols salés la dynamique des sels est caractérisée par les traits suivants. Au mois d'avril de l'année 1955 la salure des horizons supérieurs (0-40) était égale (céréales, luzerne) ou inférieure (jachère, légumineuses) à celle des horizons inférieurs. Dès le mois de juin les horizons supérieurs sont devenus plus salés que les horizons inférieurs dans tous les sols non-irrigués (jachère, après juin), irrigués au printemps (céréales, légumineuses) ou irrigués tout l'été (coton). Toutefois dans la sole de luzerne on constate un fort lessivage au cours de la période d'irrigation (septembre et décembre).

Par contre, dans tous les sols peu salés la salure des horizons supérieurs reste généralement égale ou inférieure à celle des horizons profonds, quelle que soit la culture ; la remontée des sels et leur accumulation dans les horizons supérieurs ne s'y produisent pas.

f) En ce qui concerne l'influence de la salure des eaux d'irrigation sur la solonetzation éventuelle des profils, on peut remarquer que dans ces sols à calcaire fin le pourcentage du sodium échangeable reste faible (4 % en moyenne). Par contre le taux du magnésium échangeable augmente dans certains cas. Dans ces terres l'adsorption du magnésium se fait au dépens du calcium échangeable. L'augmentation du taux de magnésium échangeable semble être due à sa migration vers le haut sous l'effet de l'irrigation des horizons profonds, dont le complexe absorbant est riche en cet élément.

g) L'étude des caractères de la couche arable nous montre le « grossissement » de la structure sous l'effet de l'irrigation. Il semble aussi que la remontée de la nappe a provoqué les conditions favorables au phénomène de « tirsification » et que nous assistons à ses débuts. Ce phénomène se traduit par le grossissement de la macro-structure, l'augmentation de la compacité, l'apparition du phénomène de foisonnement des mottes et le jaunissement des horizons inférieurs. Toutefois, ces changements de l'état structural semblent être en relation avec l'excès d'humidité dans le sol (nappe peu profonde) et non pas dus aux sels des eaux d'irrigation.

IV. Etudes dans les cases lysimétriques

En 1954 nous avons repris à Rabat nos études de l'action de la salure des eaux sur les sols, cette fois dans des cases lysimétriques de deux mètres de profondeur. Pour cette expérience nous avons choisi trois types de sols : tirs (sol argileux hydromorphe lourd de Sidi Slimane), sol brun des Beni Amir et r'mel (sol rouge lessivé sableux à un horizon argileux de Rabat). Pour chaque type de sol le programme prévoyait une case non irriguée, une case irriguée à l'eau douce, deux cases irriguées à l'eau saumâtre (NaCl — 1,5 g/l) avec ou sans addition de plâtre, avec des volumes d'irrigation nécessaires pour ramener l'humidité des sols à sa capacité de rétention (dose 1) et deux cases similaires mais irriguées avec des volumes d'eau supérieurs à la capacité de rétention des sols (dose 2, égale à 1,5 dose 1). Dans toutes ces cases le drainage avait été assuré. En 1958 nous avons mis en service deux cases supplémentaires dans lesquelles le plan d'eau sera maintenu près de la surface du sol, l'une à l'eau douce, l'autre à l'eau saumâtre.

Malgré que cette étude soit encore en cours d'exécution, il est possible de donner toutefois quelques renseignements concernant l'influence des irrigations à l'eau salée sur les rendements du coton et du maïs, cultures expérimentées dans nos cases en assolement biennal.

Les résultats de quatre années d'essais sont présentés au tableau III. Il s'ensuit de la lecture des valeurs inscrites à ce tableau que, contrairement à ce qu'on pourrait penser, l'irrigation à l'eau saumâtre (1,5 g/l de NaCl) n'a pas provoqué la baisse générale de rendements de ces cultures. Le coton et le maïs cultivés sur les sols bruns des Beni Amir et sur les tirs de Sidi Slimane, irrigués à l'eau saumâtre, accusent au contraire une augmentation sensible de la récolte, par rapport aux cases irriguées à l'eau douce, et celà pendant quatre années consécutives. L'effet positif de l'eau saumâtre est plus sensible dans les sols bruns, où les rendements ont augmenté de 20 % environ, que dans les tirs, où l'augmentation de récolte resta de l'ordre de 5 %, sauf la première année (coton), où elle atteignit 20 %. En ce qui concerne les sols sableux (r'mel), les résultats sont plus disparates. En effet on observe la baisse des rendements les deux premières années (1955 et 1956) et leur augmentation au cours des deux années suivantes (1957 et 1958).

Il résulte de ces essais que le comportement des plantes irriguées à l'eau saumâtre dépend en large mesure du type pédologique du sol. En effet, dans nos essais toutes les conditions autres que le sol étaient les mêmes : même climat, même plante, même technique d'irrigation. Or l'irrigation à l'eau saumâtre, qui a augmenté les rendements du coton et du maïs dans les sols bruns, a eu peu d'effet dans le sol argileux lourd ;

dans les sols sableux elle a eu même des effets dépressifs, au moins les deux premières années. Ce comportement des plantes parait être en relation étroite avec les caractères internes des sols.

RESUME

Les différentes études réalisées au Service de la Recherche Agronomique sur l'évolution des sols des Beni Amir irrigués avec une eau saumâtre dont le taux de chlorures, exprimé en NaCl, dépasse 1,0 g/l et peut même atteindre 1,5 g/l, ont montré que la salure des sols bien drainés de cette région ne présente pas d'obstacles pour les cultures. Par contre la remontée de la nappe salée consécutive aux irrigations contribue largement au salage de ces sols.

La présence du calcaire dans les terres des Beni Amir, de nature argilo-limoneuse calcaire, semble s'opposer à la solonetzation des profils. On observe toutefois l'enrichissement du complexe absorbant des horizons supérieurs en magnésium échangeable, probablement au dépens des horizons profonds, riches en cet élément, dans des zones où la nappe reste proche de la surface.

Les changements de l'état structural des sols constatés depuis la mise en eau du périmètre semblent être en relation avec l'excès d'humidité dans le sol (nappe peu profonde) et non pas dus aux sels des eaux d'irrigation.

Les essais réalisés depuis quatre ans dans des cases lysimétriques sur les irrigations à l'eau salée (1,5 g/l de NaCl) de trois types des sols : tirs (sol argileux lourd), sol brun (argilo-limoneux calcaire) et r'mel (sol sableux lessivé à un horizon argileux), ne montrent pas d'effets nocifs des sels sur les cultures du coton et du maïs. Au contraire, dans certaines cases arrosées à l'eau salée on constate l'augmentation des rendements par rapport aux cases arrosées à l'eau douce.

G. Bryssine,

BIBLIOGRAPHIE

1. R. Jaminet. — *Aperçu sur les sols et irrigations du périmètre des Beni Amir*, dans : *Etude des sols du périmètre irrigable des Beni Amir-Beni Moussa.* Service de la Recherche Agronomique et de l'Expérimentation Agricole, Rabat 1953, pp. 1 - 10.

2. G. Bryssine. — *Etude Expérimentale de l'irrigation du sol des Beni Amir.* Centre de Recherches Agronomiques, Rabat 1945.

3. G. Bryssine et G. Cherotzky. — *Note sur la relation entre la salure du sol, celle de l'eau d'arrosage et le régime des irrigations.* Note présentée au Congrès de l'Association Française pour l'Avancement des Sciences, Tunis, mai 1951. Travaux de la Section de Pédologie de la Soc. Sc. Nat. Phys. Maroc - Tome 4-5, Rabat 1952, pp. 73-79.

4. M. Tahiri. — *Rapport préliminaire sur l'évolution des sols des Beni Amir.* Note dactylographiée de novembre 1955. Résumé publié sous le titre : *Etude de l'évolution des sols des Beni Amir sous l'effet de l'irrigation* dans : Travaux de la Section de Pédologie de la Soc. Sc. Nat. Phys. Maroc - Tome 10-11. Rabat 1955-56, p. 80.

5. G. Bryssine. — *Etude sur l'évolution de la salure des sols sous l'effet des irrigations.* Note présentée à la réunion de la Section de Pédologie de la Soc. Sc. Nat. Phys. Maroc. Mai 1958, Rabat.

ETUDE SUR L'EVOLUTION DES SOLS DES BENI AMIR ET DE LEUR SALURE SOUS L'EFFET DES IRRIGATIONS

INTRODUCTION

Le Service de la Recherche Agronomique a repris dès le début de 1955 les recherches sur la dynamique des sels dans le périmètre irrigué des Beni Amir (1) suivant le programme initial ci-dessous :

1. Etude détaillée de l'évolution de la salure du sol en cinq points différents du domaine de Yakoubia sur cinq soles différentes ;

2. Etude plus sommaire de la totalité des Beni Amir en prélevant des échantillons de terre en seize points (stations d'étude) du périmètre sur des soles différentes (2).

3. Prélèvements et analyses d'eaux d'irrigation et d'eaux de drainage en différents points du périmètre.

Ces stations d'étude ont été réparties aussi bien dans l'ancien périmètre (à l'est de la route n° 22) que dans le nouveau (à l'ouest de cette route). Pour le choix de l'emplacement il a été tenu compte, d'une part de la nature des sols et de la profondeur de la nappe, d'autre part des desiderata des Services agricoles locaux.

*
**

DESCRIPTION DES STATIONS D'ETUDES

Nous donnons ici, avec des indications sur la nature du sol et les caractères de la nappe, la liste des stations d'études où les prélèvements furent effectués au cours de la campagne 1955 (voir la carte ci-jointe).

Les indications sur la profondeur de la nappe et sur sa salure se rapportent au mois de janvier 1955.

---

(1) Pour la description générale de la région, voir le travail de R. Jaminet « Etude des sols du périmètre irrigable des Beni-Amir Beni-Moussa ». Service de la Recherche Agronomique et de l'Expérimentation Agricole. Rabat 1953, pp. 3-10. pp. 3-10.

(2) Le nombre des prélèvements par station était variable, suivant l'assolement adopté dans chaque station.

1° *Maison du moniteur du secteur* 2 — sol brun rouge à croûte stalactiforme (profil N-410), nappe assez profonde, moyennement salée (NaCl - 1,87 o/oo), cinq prélèvements, soit par sole (jachère, fèves, blé, coton, luzerne).

2° *PPI-5* (*prairies permanentes irriguées*) — sol brun rouge à croûte stalactiforme (profil N-422), nappe peu profonde (1,30 m) et moyennement salé (NaCl-1,99 o/oo), trois prélèvements (jachère, avoine, luzerne).

3° *Secteur* 4 — sol brun à croûte nodulaire épaisse (profil N-412), nappe à faible profondeur, moyennement salée (NaCl - 2,10 o/oo), cinq prélèvements (jachère, fèves, blé, coton, luzerne).

4° *P B A* (*Pépinière des Beni Amir*) — sol brun sur limon (profil N-419), nappe à faible profondeur (1,30 m) moyennement salée (NaCl - 1,87 o/oo) — trois prélèvements (jachère, blé, verger).

5° *ALBA* (*Association laitière des Beni Amir*) — sol brun sur limon faiblement encroûté (profil N-411), nappe moyennement profonde (3,45 m), moyennement salée (NaCl - 2,17 o/oo), cinq prélèvements (jachère, fèves, blé, coton, luzerne).

6° *Secteur* 6 — sol brun sur limon faiblement encroûté (profil N-414), nappe à 1,50 m, moyennement salée (NaCl - 1,80 o/oo), trois prélèvements (jachère, blé, luzerne).

7° *Secteur* 10 — sol brun à croûte graveleuse (profil N-418), nappe à 1,80 m, moyennement salée (NaCl - 1,63 o/oo), quatre prélèvements (jachère, blé, coton, luzerne).

8° *Secteur* 13 — sol brun sur limon faiblement encroûté (profil N-421), nappe à 1,05 m, moyennement salée (NaCl - 1,70 o/oo), quatre prélèvements (fèves, blé, coton, luzerne).

9° *Secteur* 7 — sol brun à croûte graveleuse (profil N-415), nappe à 2,70 m, moyennement salée (NaCl - 1,75 o/oo) cinq prélèvements (jachère, fèves, blé, coton, luzerne).

10° *P.F.O.* - 1 (*Patrimoine foncier de l'Office*) — deux types de sols : sol brun à croûte graveleuse (profil N-413), nappe profonde à 4,55 m, moyennement salée (NaCl-1,65 o/oo), cinq prélèvements (jachère, blé, coton, menthe, verger), et sol brun sur limon (profil N-427), nappe très profonde à 12 m, peu salée (NaCl - 1,17 o/oo).

11° *Domaine de Yacoubia* — sol brun sur limon, faiblement encroûté (profil N-409), nappe près de la surface à 0,75 m, moyennement

salée (NaCl - 1,87 o/oo), cinq prélèvements (jachère, fèves, blé, coton, luzerne).

12° *Secteur* 8 — sol brun à croûte graveleuse (profil N-416), nappe peu profonde à 0,90 m, assez salée (NaCl - 2,34 o/oo), cinq prélèvements (jachère, fèves, blé, coton, luzerne).

13° *Station Expérimentale* (sortie sud de Fquih Ben Salah) — sol brun à croûte graveleuse (profil N-424), nappe profonde à 7,00 m, peu salée (NaCl - 0,8 o/oo) pas de prélèvement en 1955 à cause de l'aménagement de la Station.

14° *Secteur* 17 — sol brun à croûte graveleuse (profil N-425), nappe profonde à 12,50 m, non salée (NaCl - 0,46 o/oo), trois prélèvements (jachère, blé, coton).

15° *P F* 0-4 — sol brun à croûte graveleuse (profil N-417), nappe peu salée, (NaCl - 1,17 o/oo), quatre prélèvements (jachère, fèves, blé, luzerne).

16° *Domaine de Sidi-Moussa* — sol brun à croûte nodulaire (profil N-420), nappe peu profonde à 1,50 m, moyennement salée (NaCl - 1,98 o/oo), trois prélèvements (jachère, blé, luzerne).

17° *SACIMA* — sol brun à croûte nodulaire (profil N-426), nappe à 0,5 m, peu salée (NaCl - 0,74 o/oo). (Pas de prélèvements en 1955).

18° *Secteur* 20 — sol brun à croûte graveleuse (profil N-428), nappe à 3,60 m, peu salée (NaCl - 0,70 o/oo), quatre prélèvements (jachère, blé, coton, luzerne), irrigué par le drain.

Comme nous l'avons indiqué au début, le programme d'étude prévoyait aussi le prélèvement périodique d'échantillons d'eau en différents points du canal secondaire d'irrigation de la prise 11 et des drains : n° 1 (notre nomenclature) situé entre les canaux 9 et 10, n° 2 entre les canaux 10 et 11, n° 3 entre les canaux 11 et 12 et n° 4 dans la partie ouest du périmètre (Sidi Moussa - Bir Ghejjat), ce dernier drain servant à irriguer la station d'étude du secteur 20 (station 18). La carte ci-jointe donne l'emplacement de ces points de prélèvement.

ORGANISATION DE L'ETUDE

Avant de commencer les recherches sur la dynamique des sels il a été procédé aux études détaillées (morphologiques, physiques et chimiques) des profils de sol de chaque station. Les résultats généraux de cette étude sont consignés dans le travail de M. Tahiri : « Rapport préliminaire sur l'évolution des sols des Beni Amir » (novembre 1955).

L'étude de la dynamique de la salure sur place a nécessité des prélèvements périodiques d'échantillons de sols à différentes profondeurs (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 et 80-100 cm). Ces prélèvements ont été effectués quatre fois par an (avril, juin, septembre et décembre) dans toutes les stations d'étude. A la Station Yacoubia, où l'on devait faire les prélèvements avant et après chaque irrigation, le programme n'a pas pu être réalisé : il a été impossible d'être prévenu à temps avant chaque irrigation.

Les échantillons prélevés (de terre et d'eau) ont été analysés sur place au laboratoire créé dans ce but à Fquih Ben Salah par le Service de la Recherche Agronomique. Ces analyses ont porté sur :

1° la détermination de l'humidité du sol au moment du prélèvement,

2° le dosage des chlorures et des carbonates,

3° l'appréciation de la teneur en sulfate.

Le programme d'étude prévoyait aussi les prélèvements d'échantillons de terre de la couche arable des parcelles d'étude, en vue de leur analyse aux laboratoires du Service de la Recherche Agronomique de Rabat. Au mois d'avril 1955 nous n'avons fait, par un agent du Service de la Recherche Agronomique, que les déterminations sur place de la densité apparente et de la perméabilité, les sols de ces stations ayant été étudiés quelques mois auparavant (en janvier) par M. Tahiri. L'année suivante (en avril 1956) les déterminations sur place ont été suivies par des prélèvements d'échantillons de terre et leur analyse détaillée suivant le programme déjà cité. Pour que cette étude fût complète, il aurait fallu faire les prélèvements en automne, après la saison d'irrigation ; des circonstances indépendantes de notre volonté ne nous ont pas permis de les réaliser, ni en 1955, ni en 1956.

PREMIERE PARTIE

ETUDE SUR LA SALURE DES EAUX D'IRRIGATION ET DE DRAINAGE

Pour la meilleure compréhension des problèmes d'irrigation posés par la remontée de la nappe et le salage consécutif des sols, il nous a paru opportun de donner ici quelques précisions sur les variations de la salure des eaux de l'oued Oum-er-Rebia, source de l'irrigation des Beni Amir. Les eaux de cet oued contiennent des doses notables de sels. La teneur en chlorures (sel principal), exprimée en g/l NaCl, varie à la fois suivant les saisons et d'une année à l'autre. Pour illustrer ces variations nous reproduisons au tableau I et par le graphique I les données sur la salure de l'oued observées pendant les années 1931-1938 à l'ancienne Station Expérimentale de Dar Ould Zidouh. Nous y joignons aussi, pour expliquer les variations de la salure, les relevés pluviométriques du poste d'Azrou correspondant à la même période, car c'est la pluviométrie du Moyen Atlas, où se trouve la source de l'Oum-er-Rebia, qui règle le débit de cet oued et par conséquent sa salure.

La salure des eaux de l'Oum-er-Rebia, qui oscillait en moyenne au cours de ces années d'observation autour de 0,84 o/oo, décroît pendant la saison humide et augmente pendant la saison sèche. En général c'est au printemps que la teneur en sels des eaux devient la plus basse ; elle augmente ensuite en été pour atteindre son maximum en automne et diminuer de nouveau en hiver. L'époque (mois) pendant laquelle la salure de l'oued descend jusqu'à son minimum varie d'une année à l'autre : cette époque paraît osciller entre le mois de décembre et le mois d'avril. L'étude du tableau nous montre qu'elle est en relation étroite avec la répartition des pluies au cours de l'année. La salure commence à s'abaisser quand la quantité totale des pluies enregistrées à Azrou atteint 300-400 mm et atteint son minimum quand celle-ci arrive à 500-600 mm au cours de l'hiver ou au début du printemps. Les pluies importantes tombées d'un seul bloc peuvent abaisser d'ailleurs cette dernière valeur, comme par exemple en novembre 1934 (227 mm). La salure augmente ensuite, même si les pluies tardives du printemps sont importantes ; dans ce cas elle croît seulement moins rapidement que lorsque le printemps est plus sec.

La courbe moyenne de la dynamique de la salure des eaux de l'Oum-er-Rebia observée au cours des années 1931-1938 peut être considérée comme celle représentant l'allure générale de la variation de la salure de l'oued au cours de l'année, car la pluviométrie moyenne observée pendant cette période se rapproche de la pluviométrie « normale »

d'Azrou, calculée pour 25 ans (voir tableau II). Nous pouvons donc comparer les observations faites pendant 1955 et 1956 avec celles des années 1931-1938, prises comme base de comparaison.

L'année agricole 1954-1955 est caractérisée par une pluviométrie moyenne (748 mm à Azrou contre 838 mm de l'année « normale »). En raison des pluies hivernales assez tardives (436 mm contre 301 mm), c'est à partir du mois de février qu'on observe la diminution de la salure des eaux du canal d'irrigation (voir tableau II et graphique II), en retard d'un mois par rapport aux données de l'année « normale » (données des années 1931-1938). Elle diminua ensuite brusquement à cause des pluies abondantes du printemps pour atteindre son minimum : 0,11 g/l, au mois suivant (avril) et le maintenir jusqu'au mois de juin inclus, c'est-à-dire jusqu'à l'époque où « normalement » la salure de l'oued commence à se rapprocher de son maximum. A partir de ce mois la salure augmente rapidement et dépasse 1,0 g/l.

La pluviométrie de l'année agricole fut très élevée cette année (1 207 mm à Azrou contre 838 mm en année normale). Sa répartition est caractérisée par de fortes pluies en automne (mois d'octobre), suivies d'une saison relativement sèche (pour Azrou) qui dura jusqu'au mois de février. Au cours des mois suivants (février-avril) la pluviométrie augmenta d'une manière excessive (649 mm contre 294 mm de l'année « normale ») pour s'arrêter pratiquement au mois de mai. Grâce aux fortes pluies de l'automne la salure des eaux du canal commença à diminuer progressivement à partir du mois d'octobre. Les fortes pluies printanières accélérèrent cette diminution et le minimum s'étala du mois d'avril au mois de juin inclus, comme l'année précédente. L'augmentation de la salure fut moins rapide cette année. Ce fut seulement au mois de septembre que la salure atteignit 1,0 g/l.

En comparant entre elles les salures moyennes totales des eaux du canal d'irrigation et celles des drains, on s'aperçoit que la salure des trois premiers drains est supérieure à celle du canal, tandis que la salure du drain 4 des Beni Amir de l'ouest est nettement plus basse (voir graphique II et tableau III), ce qui confirme les observations déjà faites au sujet de la nappe des Beni Amir : elle est plus salée à l'est de la route n° 22 qu'à l'ouest. On remarque de plus, d'une manière générale, que les variations des courbes de la salure des eaux des drains suivent à peu près celle du canal d'irrigation, ce qui indique la relation étroite qui existe entre les eaux d'irrigation et celles de la nappe phréatique drainée par les colatures. On remarque aussi que la salure du canal n'est pas uniforme tout le long du parcours : la salure des eaux du bief supérieur (aval du canal) se rapproche de la salure des trois premiers drains, tandis que la

salure du bief inférieur se rapproche de la salure du drain 4. Les variations de la salure dans les drains sont moins régulières.

Pour éclaircir cette constatation assez surprenante nous avons reproduit, par le graphique III, les variations de la salure moyenne annuelle tout le long des drains et du canal d'irrigation. Il ressort de l'analyse de ce graphique que d'une manière générale la salure augmente progressivement au fur et à mesure de l'éloignement du canal principal et que cette augmentation devient très sensible dès que le canal d'irrigation 11 et les drains 2 et 3 abordent la zone salée, où la nappe est près de la surface, entre Ouled Regaïa et Yakoubia ; cela est surtout bien visible dans le cas du drain 3, situé entre les canaux d'irrigation 11 et 12. Ce dernier drain a une autre particularité, celle d'être moins salé dans son cours inférieur, qui passe, après avoir traversé la route n° 22, dans les Beni Amir de l'ouest.

Il résulte de ces observations un fait très important : la nappe phréatique de la zone salée des Ouled Regaïa-Yakoubia sale les drains qui les parcourent, chose tout à fait naturelle ; mais elle paraît, déduction inattendue, saler en même temps les eaux du canal d'irrigation dès que celui-ci entre dans cette zone. Les eaux souterraines des Beni Amir de l'ouest semblent par contre diluer les eaux souterraines des Beni Amir de l'est dès que celles-ci pénètrent dans cette région. Ce dessalage partiel se traduit par l'abaissement de la salure du bief inférieur, à l'ouest de la route n° 22, du drain 3.

DEUXIEME PARTIE

ETUDE SUR LA SALURE DES SOLS DES BENI AMIR

Dans cette deuxième partie nous exposons les résultats des observations faites sur place au cours de l'année 1955. Il s'agit ici d'interpréter les chiffres concernant les chlorures et l'humidité des sols obtenus au laboratoire de Fquih.

Comportement des sels

La première impression que donne la lecture de ces chiffres est leur extrême disparité. Il semble à première vue qu'il ne soit pas possible d'obtenir des indications quelconques, ni sur les caractères de la salure (exprimée ici en NaCl o/oo), ni sur sa dynamique.

Cette disparité semble tenir à l'extrême mobilité des sels, laquelle provoque des hétérogénéïtés aussi bien dans le sens vertical (suivant la profondeur) que dans le sens horizontal : on peut observer ainsi des différences dans la répartition des sels d'un point à l'autre dans la même parcelle. De plus, la répartition des sels dans les profils dépend du moment du prélèvement par rapport à la date de l'irrigation précédente (abaissement de la teneur en sels après les irrigations, son augmentation au cours de la dessiccation progressive qui se poursuit jusqu'à l'irrigation suivante). Or, comme nous l'avons signalé dans les pages précédentes, il a été impossible d'effectuer les prélèvements au moment opportun.

Toutefois, l'analyse attentive des chiffres permet de dégager quelques renseignements sur le comportement des sels, en l'occurrence des chlorures, dans les sols des Beni Amir. Les moyennes annuelles peuvent être en effet d'un grand secours pour dégager le sens de la dynamique des sels, chaque cas perdant toute signification particulière. Il devient alors possible de distinguer dans notre cas les sols où les sels ont tendance à remonter vers la surface de ceux où les sels sont même partiellement lessivés.

Dans ce but nous avons calculé les valeurs moyennes annuelles de la salure des sols (suivant les profils) de chaque sole de chaque station. Ces résultats sont consignés dans les tableaux IV à IX ci-joints.

La première conclusion qui se dégage de la lecture des chiffres est le salage généralisé de tous les sols des Beni Amir. En moyenne le taux de chlorures, exprimé en NaCl, dépasse largement 1,0 o/oo.

Toutefois il est possible de distinguer plusieurs zones suivant le degré de leur salure.

Les sols les plus salés de la partie est du périmètre se trouvent, soit dans la zone dite des résurgences, soit dans son voisinage immédiat. C'est le cas des stations 12, 11, 4, 8 et 7, où la teneur moyenne annuelle en NaCl dépasse 1,9 o/oo. La salure est moins élevée dans les autres stations de cette partie du périmètre (partie est), située en dehors de la zone des résurgences ; les valeurs moyennes annuelles du taux de NaCl y restent inférieures à 1,5 o/oo. La forte salure moyenne annuelle de la station 2 (3,78 o/oo) est due à la salure élevée de la sole « jachère » (6,44 o/oo en NaCl) ; par contre les taux de NaCl des deux autres soles (céréales et luzerne) ne dépassent pas 2 o/oo (1,89 o/oo et 1,64 o/oo). C'est pour cette raison que dans ce tableau nous avons mentionné deux fois la station 2 (PPI).

Le phénomène du salage paraît être moins important dans les Beni Amir de l'ouest, si l'on en juge d'après les caractères des sols de nos stations. Malheureusement le nombre des stations d'étude, par rapport à l'étendue de cette partie du périmètre, n'est pas suffisant pour pouvoir se prononcer d'une manière catégorique.

La deuxième conclusion se rapporte à la relation entre la salure du sol et les caractères de la nappe. Pour en faciliter l'interprétation nous avons groupé dans le tableau X nos stations d'études suivant l'ordre décroissant des valeurs de la salure moyenne annuelle dans les horizons supérieurs (0-40), aussi bien dans les Beni Amir de l'est que dans ceux de l'ouest, avec des indications sur les caractères de la nappe et l'état hydrique moyen des sols.

On voit bien d'après ces chiffres que la teneur en chlorures est en relation étroite avec la profondeur de la nappe : plus celle-ci est profonde, moins la salure du sol est élevée. Parallèlement l'humidité moyenne des sols décroît dans le même sens ; dans les sols vraiment salés (teneur en NaCl supérieure à 2 o/oo) elle s'approche de 16 %, dans les sols peu salés elle oscille autour de 10-11 %.

Cette relation étroite entre la salure du sol et les caractères de la nappe (sa profondeur) fait penser à la remontée capillaire des sels de la profondeur vers la surface en vertu du mécanisme suivant : dans les sols qui restent constamment humides les solutions salines peuvent se déplacer vers le haut sous l'effet de l'évaporation intense qui règne dans ces régions pendant l'été. En effet, l'évaporation due à la chaleur et à la siccité atmosphérique, provoque, du fait de la proximité de la nappe, l'ascension de l'eau et, accessoirement, celle des sels qui s'y trouvent dissous. C'est

le phénomène bien connu de la remontée capillaire de l'eau dans les tubes fins à partir de la surface d'eau libre.

Cette hypothèse de la remontée capillaire dans la zone où la nappe est près de la surface du sol est confirmée par les chiffres de la répartition des chlorures suivant la profondeur. Dans le tableau XI nous avons reproduit la répartition moyenne de NaCl (o/oo) dans les profils par saison, d'une part dans les sols salés (station 12, 11, 4, 8 et 7) et d'autre part dans les sols peu salés (stations 6, 9, 10 et 5) de la partie est des Beni Amir.

Les valeurs moyennes annuelles montrent la tendance à l'accumulation des sels dans les horizons supérieurs des profils des sols salés : 2,22 o/oo (0-40) contre 1,90 o/oo (40-100). Par contre la répartition des sels est inversée dans les sols peu salés : 1,20 o/oo (0-40) contre 1,49 o/oo (40-100).

Cette différence entre les deux groupes de sols (sols salés et sols peu salés) est soulignée encore par le comportement de la salure au cours de l'année.

En effet, dans les sols du premier groupe (sol salés) la salure des horizons supérieurs (0-40) au mois d'avril est plus basse que celle des horizons sous-jacents (lessivage hivernal). A partir du mois de juin les horizons supérieurs deviennent plus salés que les horizons inférieurs et la différence entre les deux horizons s'accentue avec le temps.

Dans les sols du deuxième groupe (peu salés), où la salure des horizons supérieurs est en général plus basse que celle des horizons sous-jacents, on constate seulement une tendance à l'égalisation de la salure dans tout le profil au cours de l'été, suivie à nouveau de l'abaissement de la salure des horizons supérieurs à l'automne. Ces sols paraissent subir un lavage partiel au cours de la saison d'arrosage, car la salure moyenne totale tombe, entre le mois d'avril et le mois de juin, de 1,72 o/oo à 1,24 o/oo.

Cette dynamique saisonnière de la salure semble être en relation avec le mouvement de l'eau dans ces sols.

En effet, l'humidité moyenne des sols reste constante et élevée au cours de l'été tout le long des profils des sols du premier groupe, ce qui réalise les conditions propices à la remontée des sels de la profondeur vers la surface, les sols pouvant être alimentés en eau par ascension capillaire à partir de la nappe proche de la surface au fur et à mesure de l'évaporation. Par contre, dans les sols du deuxième groupe, où la nappe est relativement plus profonde, les sols se dessèchent davantage, surtout

leurs horizons supérieurs. La remontée capillaire s'arrête et la salure du sol reste alors assez basse.

Influence des cultures

En ce qui concerne l'influence des cultures sur le régime des sels, il est difficile de fixer des règles bien précises, car les assolements variaient d'une station à l'autre. A titre indicatif nous donnons dans le tableau XII la salure moyenne annuelle (en NaCl) de chaque profil des différentes soles.

D'une manière générale, on retrouve des doses élevées de NaCl dans toutes les soles, sauf dans celles de luzerne (à une exception près : station 7). L'humidité des sols salés est, d'une manière générale, surtout dans les parcelles en jachère, céréales et légumineuses, plus élevée que celle des sols non salés. Or, ces sols n'étant pas irrigués en été, leur humidité devrait être relativement basse, du même ordre de grandeur que celle des parcelles non salées. Si elles restent en fait humides pendant toute l'année, c'est à cause de l'élévation de la nappe observée aux Beni Amir au cours de l'été pendant la saison d'irrigation, élevation qui contribue à l'humidification des sols et par voie de conséquence à leur salage. Ceci démontre encore une fois l'importance du phénomène de la remontée des sels dans les sols humidifiés par la remontée de l'eau de la nappe.

La salure des sols parait être moins élevée dans les parcelles de coton irriguées au cours de l'été. Ici on n'observe pas de relation étroite entre la salure des sols et leur état hydrique. Ceci s'explique par le fait que la salure des sols irrigués dépend en large mesure, comme nous l'avons indiqué déjà au début, du moment du prélèvement des échantillons par rapport à la date d'irrigation et du volume d'eau donné (avec ou sans excès) ; de sorte que la certitude ne peut s'obtenir qu'en faisant de plus nombreux prélèvements.

La salure des parcelles de luzerne a été la plus basse, même aux stations 11 (Yakoubia) et 12 (Secteur 8), les plus salées, les taux moyens annuels de ces parcelles étant respectivement de 1,44 o/oo et 1,52 o/oo. Ce fait s'explique aisément par l'irrigation massive de cette culture et par le mode d'irrigation par submersion, qui facilitent le lavage partiel des sols. Là aussi, on n'observe pas, comme dans les parcelles de coton et pour les mêmes raisons, de relations directes entre la salure et l'état hydrique du sol, d'une part, et la profondeur de la nappe, d'autre part.

Les variations de la salure au cours de l'année, par culture, sont reproduites, à titre indicatif, dans le tableau XIII. Les chiffres de ce

tableau nous montrent la différence de comportement des sels au cours de l'année entre les sols salés et les sols peu salés, quelle que soit la culture.

Dans les sols salés la dynamique des sels est caractérisée par les traits suivants : au mois d'avril de cette année (1956) la salure des horizons supérieurs (0-40) était égale (céréales, luzerne) ou inférieure (jachère, légumineuses) à celle des horizons inférieurs. Dès le mois de juin les horizons supérieurs deviennent plus salés que les horizons inférieurs dans tous les sols non irrigués (jachère, après juin), irrigués au printemps (céréales, légumineuses) ou irrigués tout l'été (coton, luzerne en partie). Toutefois dans la sole de luzerne, on constate un fort lessivage au cours de la période d'irrigation (septembre et décembre).

Par contre dans les sols peu salés la salure des horizons supérieurs reste généralement égale ou inférieure à celle des horizons profonds, quelle que soit la culture ; c'est donc que ni la remontée des sels ni leur accumulation dans les horizons supérieurs ne s'y produisent.

TROISIEME PARTIE

RECHERCHES SUR LES CARACTÈRES DE LA COUCHE ARABLE DES STATIONS D'ÉTUDE DES BENI AMIR

Dans le tableau XIV nous donnons les résultats des analyses de ces terres. Ces analyses comportaient l'étude de la matière organique et du complexe absorbant, ainsi que celle des propriétés physiques et en particulier de la structure. Dans le tableau XV nous reproduisons les moyennes d'analyses par station. Il nous a paru intéressant d'y ajouter quelques données sur les terres des Beni Amir, soit avant leur irrigation (N-237 et N-238, prise dans les Beni Amir de l'ouest), soit non-irrigué normalement (N-236 près de la séguia dans les Beni Amir de l'est). Ces profils appartiennent comme la plupart des terres de nos stations d'études aux sols bruns à croûte graveleuse, formés sur limon encroûté.

Comportement des sols

Les analyses nous montrent d'abord des sols relativement riches en humus et en azote : dans la plupart des stations le taux d'humus dépasse 2,0 % et celui de l'azote 1,0 o/oo. Les irrigations ne paraissent influencer beaucoup ni le taux global d'humus, ni ses caractères, en particulier sa richesse en azote. En effet, la teneur en ces éléments (humus et azote) des parcelles irriguées est identique à celle de la couche arable des profils N-236 et N-238.

La capacité d'échange des bases est moyenne (24 méq %) et le cation prédominant est représenté par le calcium : 69 % de la capacité d'échange des bases, en moyenne ; le taux de magnésium varie, avec beaucoup d'écarts, soit d'une station à l'autre, soit à l'intérieur de la même station. Dans les stations 10 (PFO-I) et 14 (secteur 17) son taux est faible : 13 % et 11 % respectivement. Dans les cinq autres, 11 (Yacoubia), 7 (secteur 10), 3 (secteur 4), 18 (secteur 20) et 16 (Sidi-Moussa), sa teneur oscille autour de la moyenne 24 %. Enfin, dans les terres de la station 19 (secteur 11) presque la moitié du complexe est saturé par le magnésium : 48 % de la C.E.B. Il faut remarquer aussi que dans toutes les parcelles de cette dernière station le taux du magnésium échangeable est élevé, tandis que dans d'autres il apparaît sporadiquement, comme dans la parcelle 3 f (51 %) ou 11 b (37 %). Dans toutes ces terres l'adsorption du magnésium se fait aux dépens du calcium échangeable, dont le taux s'abaisse proportionnellement à l'accroissement de celui de magnésium. En ce qui concerne le sodium échangeable, son

pourcentage dans le complexe, sauf en 3 c et 11 c, est faible : 4 % en moyenne, malgré l'irrigation à l'eau contenant des doses notables de sodium. Le taux du potassium échangeable reste assez constant et faible : 3 % environ.

Si l'on compare ces données à celles des profils N-236 et N-238, on s'aperçoit que le taux du magnésium dans le complexe absorbant de la couche arable a augmenté dans les parcelles d'études par rapport à ces profils. On a l'impression que cette augmentation est en rapport avec l'irrigation du périmètre. En effet le taux du magnésium augmente déjà jusqu'à 19 % dans la couche arable du profil N-236, non-irrigué mais se trouvant dans le périmètre. Il paraît rester relativement bas dans les stations où la nappe est profonde, mais augmenter par contre dans la zone dite salée où la nappe est près de la surface. Cette augmentation du taux de magnésium semble être due à sa migration vers le haut sous l'effet de l'irrigation des horizons profonds, dont le complexe absorbant est riche en cet élément, même dans les profils N-237 et N-238, qui n'ont jamais été irrigués avant leur étude en 1951. Les mêmes observations au sujet de la richesse en magnésium des horizons profonds ont été faites par M. Tahiri au cours de sa prospection de la plaine des Beni Amir durant l'hiver 1954-1955. La présence du calcaire ne paraît pas s'opposer à l'adsorption par échange du magnésium dans les horizons supérieurs. Par contre le calcaire semble être efficace pour entraver la fixation du sodium des eaux d'irrigation par le complexe, dans lequel le taux de cet élément reste, sauf quelques cas, bien faible.

D'une manière générale le degré d'agrégation des particules du sol est faible : le diamètre moyen des « agrégats fictifs » Gaf varie autour de 0,47 mm. Seules les terres du domaine de Sidi Moussa paraissent faire exception à la règle générale avec un Gaf égal à 1,34 mm. Nous étudierons cette question plus loin. Les irrigations ne paraissent pas contribuer à l'amenuisement de la microstructure, car les valeurs du Gaf des profils N-236 et N-238 sont voisines de celles de nos stations d'étude.

Malgré la finesse des agrégats la porosité des sols reste assez élevée : 52 % ; elle a diminué légèrement par rapport aux profils cités, de 6 % environ. Par contre la compacité a augmenté d'une manière très sensible. Dans la série des sols non irrigués (N-237, N-238) la porosité grossière (plus de 50 % de la porosité totale) est nettement supérieure à la porosité fine (moins de 50 %) ce qui se traduit par les valeurs du rapport Pf/Pg, inférieur à 1. Par contre dans tous les sols des stations, sauf quelques rares exceptions (3 e, 8 b, 10 v, 18 j, 19 b) la porosité fine dépasse largement 50 % de la porosité totale et le rapport Pf/Pg devient supérieur à 1. Cette augmentation de la compacité n'était pas uniforme dans toutes les

parcelles et dans toutes les stations. Ce sont surtout les deux stations où la nappe est près de la surface, 7 (secteur 10) et 11 (Yakoubia), qui donnent les valeurs les plus élevées de la compacité avec le rapport Pf/Pg largement supérieur à 2,00.

Malgré ces caractères de la porosité, qui restent encore relativement favorables dans la plupart des stations, la macrostructure du sol est devenue assez grossière, surtout dans les stations 3 (secteur 10), 11 (Yakoubia) et 18 (secteur 20). Ce grossissement de la macrostructure est bien appréciable, si on le compare avec les caractères de la macrostructure des sols non-irrigués : N-237, N-238 (dans le profil N-236 les caractères de l'horizon supérieur se rapprochant déjà de ceux des sols des stations d'essai). En effet le diamètre moyen des fractions tamisées Gt est passé de 0,20-0,13 cm à 0,96 cm en moyenne et le pourcentage des mottes A (supérieures à 2 mm) de 25 % à 65 %. Les mottes elles-mêmes sont devenues plus grossières avec un diamètre moyen Gm égal à 1,35 cm contre 0,50 - 0,39 cm des profils N-237 et N-238. Ces chiffres expriment le processus de l'agglomération progressive des agrégats dans la masse du sol, qui était auparavant finement divisée à l'état sec, en éléments structuraux grossiers supérieurs à 2 mm et visibles à l'œil nu. Les mottes, qui dans les sols non-irrigués ne représentaient que 25 % de la masse totale du sol, étaient peu compactes, avec le rapport Pmh/Pms inférieur à 1. Dans les mottes le volume d'eau susceptible d'être retenu par capillarité (Pmh) était inférieur au volume total des pores mottiers (Pms) des mottes sèches. A l'état humide les mottes pouvaient donc rester bien aérées. Au cours du grossissement de la macrostructure les mottes sont devenues plus compactes, ce qui se traduit par l'augmentation du rapport Pmh/Pms, qui se rapproche en moyenne de 1 et le dépasse dans les stations 7, 11 et 18. Dans ces stations les mottes ont acquis une autre propriété, celle de foisonner au cours de l'humidification et de subir le retrait au cours de la dessication, car le volume d'eau que les mottes peuvent absorber (Pmh) au cours de l'humidification dépasse leur porosité totale à l'état sec Pms (Pmh/Pms $<$ 1).

L'augmentation de la compacité est suivie ici de l'augmentation de la résistance relative des mottes à l'effritement au cours de l'humification. En effet le rapport 100 Lip/Pms, c'est-à-dire la quantité d'eau nécessaire pour provoquer l'effritement de la masse terreuse par rapport au volume des pores mottiers, est passé de 27-53 % des profils N-237 et N-238, à 83 % en moyenne des stations d'étude, avec des valeurs qui se rapprochent de 100 dans les stations 7 (secteur 10) et 11 (Yakoubia). Si pour le moment cette augmentation du rapport 100 Lip/Pms paraît constituer un indice favorable. il en sera autrement s'il augmente encore.

En effet, les mottes très compactes perdront leur élasticité, car pour contenir toute l'eau qu'elles pourront absorber il leur faudra augmenter leur volume. Mais cette augmentation de volume sera freinée par la résistance qu'offrira la masse des mottes non encore suffisamment humides pour permettre le déplacement aisé (début de l'état plastique) des particules des sols.

La stabilité générale de la structure des sols a augmenté par rapport aux sols non-irrigués. D'une manière générale le rapport 100 LF/Pt est passé de 69 - 58 à 117, c'est-à-dire dans ces sols la quantité d'eau égale à la porosité totale des sols n'est pas suffisante pour provoquer le déplacement libre des particules.

Ce changement de l'état structural semble résulter de la diminution des valeurs de la porosité (surtout porosité mottière ; voir tableau XIV) et de l'augmentation des valeurs globales des constantes hydriques (humidité équivalente, limite supérieure de plasticité et fluidité). Les changements de ces « constantes » paraissent être liés à l'état structural du sol plutôt qu'à ses propriétés intrinsèques, car l'état colloïdal ne semble pas subir de modifications notables.

En effet les valeurs de l'hygroscopicité maximum, laquelle est en rapport avec la surface des colloïdes, sont restées les mêmes dans les deux séries de terre. Par contre, dans ces sols à stabilité structurale originellement faible, les irrigations ont provoqué la dislocation des mottes fines et peu stables et la répartition plus régulière des agrégats dans la masse du sol, suivie d'un léger tassement (diminution de la porosité). Sous l'effet de l'humidification et de la dessication alternatives de ces sols irrigués, les mottes sont devenues plus grossières, moins poreuses et plus compactes. La diminution de la porosité grossière et l'augmentation du volume des pores fins a accru leur capacité de rétention pour l'eau (humidité équivalente). Comme il faut beaucoup plus d'eau pour travailler et pétrir les sols compacts, les valeurs des limites mécaniques se sont accrues en même temps.

Ces caractères physiques des sols rappellent déjà ceux des tirs du nord du Maroc avec leur structure grossière et compacte. On a l'impression que ces sols évoluent, surtout ceux de la zone où la nappe est près de la surface, vers ce type pédologique. Cette hypothèse semble être confirmée par l'analyse de la couleur des profils des stations d'étude. En effet les horizons profonds de la zone dite « salée » deviennent plus jaunes, avec des valeurs du ton de base qui descendent jusqu'à 15 contre 25 - 30 sur les profils de la zone à nappe profonde.

Cette évolution, défavorable du point de vue agricole, paraît se produire sous l'effet de l'eau seule. Le magnésium échangeable ne paraît pas jouer un rôle déterminant, ni dans l'état d'agrégation des sols (microstructure), ni dans celui d'agglomération en mottes (macrostructure). En effet la structure des sols de la station 19 paraît bien l'une des plus favorables de l'ensemble des stations du point de vue agricole (Gaf = 0,39 mm, Pt = 56 %, Pf/Pg = 1,07, Am = 74, Gm = 1,26, Pmh/Pms = 0,90 et 100 Lf/Pt = 120), malgré leur richesse en magnésium échangeable, la plus élevée parmi les stations étudiées (48 % de la capacité d'échange des bases).

Malgré la tendance des sols à la compacité leur perméabilité reste assez élevée : 6,8 cm/h en 1955 et 8,1 cm/h en 1956, en moyenne.

Si la lecture du tableau XIV nous montre des variations sensibles, même à l'intérieur de chaque station, celles-ci sont dues en majeure partie aux cultures et se produisent parallèlement d'une année à l'autre ; en 1955-56 les valeurs ont augmenté dans le même sens, oscillant autour des mêmes chiffres.

Pour terminer cet exposé notons que les propriétés des sols varient d'une année à l'autre, comme l'indique la comparaison des moyennes de la densité apparente avec celles de la porosité entre les années 1955 et 1956. Dans toutes les parcelles elles ont augmenté entre 1955 et 1956.

Influence des cultures

L'hétérogénéité des résultats d'analyse constatée à l'intérieur de la même station est due, au moins en partie, à l'influence des cultures pratiquées dans cette dernière. Dans le tableau XVII nous les avons groupés par type de culture : jachère, céréales, légumineuses, coton, luzerne. Pour étudier l'action de la luzerne sur les caractères des sols, cette culture étant considérée comme améliorante, nous avons calculé pour les quatre premières cultures (1) les moyennes de chaque caractère analytique pour les comparer à celles obtenues dans les luzernières. Nous y avons ajouté ensuite la moyenne totale pour ces cinq types de culture, ainsi que celle des trois premières soles : jachère, légumineuse et blé.

En ce qui concerne la matière organique, il n'y a pas de différence, ni dans le taux d'humus, ni dans celui du carbone, entre les différentes parcelles. Il paraîtrait même que le taux d'azote dans les luzernières est plus bas que dans les autres parcelles.

---

(1) Pour ces calculs nous avons pris en considération seulement les stations dans lesquelles on a pratiqué ces cinq types de culture.

La présence de la luzerne semble être par contre favorable à l'enrichissement du complexe absorbant en calcium échangeable et à l'appauvrissement en magnésium, surtout si l'on exclut de la moyenne les données analytiques de la station 19, dont les sols sont très riches en cette dernière base. Remarquons que même dans le cas de cette station la terre de la luzernière paraît être moins riche en cet élément que les parcelles en blé ou coton. Il est aussi difficile d'expliquer la richesse en magnésium des parcelles en fèves que le taux modéré dans les parcelles en jachère, bien pourvues en calcium au détriment du magnésium.

Le degré d'agrégation paraît s'accroître dans les sols des luzernières, tandis qu'il reste assez bas dans les sols des autres cultures, surtout si l'on exclut les terres de la station 16 (Sidi Moussa), où le degré d'agrégation, comme nous l'avons signalé au début, est très élevé.

Si la porosité totale ne paraît pas subir de changements suivant le type de culture pratiqué, la compacité des sols par contre est plus élevée dans les parcelles en coton et luzerne que dans les autres.

Dans ces deux types de parcelles la macrostructure devient plus grossière que dans les parcelles en jachère, légumineuse, céréale, mais le type de culture ne paraît pas influencer beaucoup la compacité des mottes. Peut-être celles-ci sont-elles moins compactes dans les sols de luzernières que dans ceux de la jachère, des céréales ou des légumineuses, mais les différences entre les parcelles sont trop faibles pour qu'on soit affirmatif.

La stabilité structurale paraît plus élevée dans les sols des parcelles de coton et des luzernières que dans les sols des trois autres cultures.

En ce qui concerne la perméabilité, on est surpris de constater que celle-ci est la plus basse dans les luzernières. Elle augmente légèrement dans les parcelles de cotonniers et devient égale et élevée dans les trois autres séries de parcelles.

Enfin la porosité des sols paraît diminuer dans les parcelles des quatre premières cultures depuis avril 1955 et augmenter dans les luzernières pendant ce laps de temps, si l'on en juge d'après les variations de la densité apparente des sols en place, qui sont inverses de celles de la porosité.

La comparaison des résultats analytiques par type de culture nous montre l'influence qu'exercent celles-ci sur les caractères des sols. Ainsi le « grossissement » de la macrostructure et l'augmentation de la compacité des sols ont été relativement peu importants dans les parcelles en jachère ou en cultures de printemps (légumineuses, céréales). Elles ont gardé en

outre une très grande perméabilité. D'une manière générale le taux de magnésium échangeable y est assez élevé (30 % de la C.E.B.).

Par contre le « grossissement » de la macrostructure et l'augmentation de la compacité sont plus importants dans les parcelles d'irrigation estivale (coton et luzerne). En même temps on constate la diminution sensible de la perméabilité et du taux du magnésium échangeable, surtout dans les luzernières, comme nous l'avons indiqué plus haut.

La détérioration, du point de vue agricole, de la macrostructure des luzernières, malgré la richesse du sol en calcium échangeable et le degré d'agrégation relativement élevé pour les sols de la région, peut surprendre les lecteurs habitués à voir dans la luzerne une culture améliorante. Elle en est une en réalité, en ce qui concerne la microstructure. Mais les conditions d'irrigation semblent contrecarrer en partie la formation d'une bonne macrostructure agricole. Les luzernières sont irriguées par submersion et très souvent d'une manière abusive, ce qui conduit d'une manière générale à la formation d'une macrostructure fondue, surtout dans ces sols à structure originellement fine et peu stable dans l'eau. Il en serait de même dans le cas des cultures de coton.

Le climat des Beni Amir, sec et très chaud en été, semble contribuer aussi à rendre la structure peu favorable du point de vue agricole. Les sols irrigués en plein été se dessèchent très rapidement, de sorte qu'il doit se produire une prise en masse du sol, suivie de fragmentation ultérieure, avant que les processus internes pédo-génétiques n'interviennent pour permettre la division du sol en mottes formées par l'agglomération des particules autour des points privilégiés.

Les rendements satisfaisants du cotonnier peuvent être expliqués dans ce cas par les binages répétés de cette culture au cours de son premier stade de croissance, ce qui facilite le développement des jeunes plantules. Les irrigations par rigoles qui humectent le sol des billons par voie capillaire le laissent à l'état divisé, même si les mottes sont grossières.

Dans le cas de la luzerne le sol est abandonné dès la mise en place des luzernières, de sorte que les jeunes plantules sont placées dès leur germination dans les conditions les plus défavorables : elles végètent sans pouvoir se développer. Plusieurs d'entre elles ne résistent pas à ce traitement, meurent aussitôt après, et la plantation prend un aspect désolant. Il serait donc intéressant, comme nous l'avons prévu à la Station Expérimentale de Fquih-Ben-Salah, d'expérimenter l'irrigation de cette culture par rigoles, pour essayer d'améliorer, au moins en partie, les conditions défavorables du milieu. Celles dues à l'action du climat restent à étudier.

CONCLUSIONS

1) Les constatations faites au cours des années 1955 et 1956 au sujet de la variation de la salure des eaux d'irrigation et de drainage dans les Beni Amir soulignent l'importance qu'il faut accorder au problème de la nappe phréatique dans ce périmètre irrigué. La salure de la partie supérieure de la nappe étudiée jusqu'à présent suit à peu près celle des eaux d'irrigation. Ce sont donc les eaux d'irrigation qui provoquent, outre la remontée générale de la nappe, constatée depuis la mise en irrigation du périmètre, son salage, surtout par leur perte dans les canaux d'amenée non bétonnés. La nappe phréatique contribue au salage des sols par remontée capillaire dans les zones des Beni Amir de l'est où elle est près de la surface. Les sels accumulés dans les sols reviennent partiellement dans la nappe par lessivage et en augmentent la richesse. Dans les Beni Amir de l'ouest la salure des eaux de la nappe reste toujours inférieure à celle des eaux d'irrigation. Les eaux du canal d'irrigation 11, dès que ce dernier pénètre dans la zone de Yakoubia à nappe proche de la surface, se salent d'une manière très nette. Si la valeur absolue de la salure n'atteint pas des chiffres élevés, le phénomène existe cependant. On peut demander : quel est le mécanisme du salage des eaux du canal ? L'hypothèse de la remontée capillaire des sels de la nappe vers le canal d'irrigation est difficilement défendable dans ces sols perméables. Il s'agit plutôt de l'infiltration des eaux souterraines salées dans le canal d'irrigation, qui fonctionnerait alors, au moins partiellement, dans les zones où la nappe est près de la surface du sol, comme un canal de drainage.

2) *Les sols du périmètre irrigué des Beni Amir contiennent des proportions notables de chlorures, dont le taux augmente et devient même un obstacle pour les cultures dans les zones où la nappe reste près de la surface du sol.*

Dans ces zones les horizons du sol au-dessus de la nappe restent constamment humides au cours de l'été, même dans les parcelles non irriguées, ce qui facilite la remontée des sels et leur accumulation dans la couche arable.

La remontée des sels et leur accumulation dans les horizons supérieurs ont lieu aussi bien dans les sols non-irrigués (jachère) ou irrigués au printemps seulement (céréales, légumineuses) que dans les sols irrigués en été (coton), exception faite des luzernières, où la salure des sols se maintient à un niveau relativement bas.

La profondeur limite de la nappe au-delà de laquelle cette accumulation ne serait plus gênante pour les cultures est à déterminer. Toutefois,

les observations faites au mois de janvier 1955 montrent que la salure des sols limoneux (sols sur limon ou sols à croûte graveleuse) reste relativement basse au cours de l'année, sans accumulation du NaCl dans la couche arable, si la surface de la nappe se trouve à plus de 2 ou 3 mètres. Cette profondeur serait de l'ordre de 1,5 à 2,0 m pour les sols à croûte stalactiforme ou nodulaire. Mais ces chiffres demandent à être vérifiés, car en été, au cours des irrigations, la nappe remonte vers la surface du sol.

Aucun salage excessif n'a été observé dans les zones où la nappe est profonde, ni dans les sols irrigués ni dans les sols en jachère (non irrigués).

3) L'étude des caractères de la couche arable des parcelles d'études nous a amenés à souligner encore une fois l'influence défavorable de la nappe phréatique sur les propriétés des sols de ce périmètre. Il semble que la remontée de la nappe a provoqué les conditions favorables à ce phénomène de tirsification et que nous assistons à ses débuts. Ce phénomène se traduit par le grossissement de la macrostructure, l'augmentation de la compacité, l'apparition du phénomène de foisonnement des mottes et, dans les endroits où la nappe est près de la surface du sol, le jaunissement des horizons inférieurs.

Cette détérioration de la structure du point de vue agricole est favorisée par le climat sec et chaud, qui facilite le dessèchement rapide du sol et sa prise en masse. Les irrigations pratiquées surtout par submersion semblent favoriser cette évolution défavorable de la macrostructure.

4) Cette étude succinte de la dynamique des sels aux Beni Amir confirme pleinement, malgré son imperfection, les conclusions exposées dans notre « Etude expérimentale de l'irrigation du sol des Beni Amir » réalisée en 1940-1941 et publiée en 1945 et les craintes qui y furent exprimées, à savoir : la possibilité de la remontée de la nappe (soit par suite de la perte d'eau dans les canaux, soit à cause des irrigations massives), suivie du salage des sols.

Il est difficile de donner des indications certaines et précises sur les remèdes à proposer pour améliorer l'état actuel des choses, faute d'avoir pu réaliser dès le début de la mise en valeur du périmètre les études expérimentales que le Service de la Recherche Agronomique avait projeté d'exécuter.

Un fait se dégage toutefois, d'une manière très nette : *il est impossible de changer l'état actuel de la salure du sol si la nappe reste près de la surface de ce sol.* Le lavage du sol par un excès d'eau d'irrigation pour le débarrasser des sels (et c'est le cas des luzernières), peut conduire à l'aggravation générale de la situation, même si l'on obtient des résultats spectaculaires en quelques points. Les essais de lavage entrepris sur une grande échelle contribueront à alimenter la nappe phréatique en eau, laquelle aura toujours tendance à s'approcher de la surface du sol. Comme conséquence les sels remonteront dans les endroits non irrigués ou non lavés, comme on l'observe déjà aux Beni Amir.

Il est donc urgent de reconsidérer le problème de la nappe souterraine et en particulier celui de son alimentation.

L'alimentation de la nappe par les irrigations proprement dites est difficile à évaluer ; nous n'avons aucun renseignement à ce sujet. Il est probable qu'elle est moins importante que celle due aux pertes d'eau des canaux, si l'on juge d'après l'état hydrique des sols au cours de la période d'irrigation. On ne constate pas d'excès d'eau dans ceux-ci au cours de cette période. Cette question mérite donc d'être étudiée.

Par contre les pertes d'eau dans les canaux d'irrigation sont très élevées. Ainsi, suivant les renseignements oraux recueillis aux Beni Amir, le canal secondaire de la prise 11 perdrait par infiltration un tiers de son débit, soit 600 l/s environ, quantité d'eau susceptible d'irriguer 1 500-2 000 ha à raison de 1/3 l/s par ha.

La source principale de l'alimentation de la nappe serait donc la perte d'eau par infiltration dans les canaux. Il est donc nécessaire d'envisager le bétonnage de tout le réseau ou au moins des canaux secondaires. Il nous semble que cette opération donnera des résultats appréciables, on supprimera ainsi, au moins en partie, l'alimentation de la nappe. Il est possible que, cette source d'alimentation tarie, l'abaissement saisonnier de la nappe, qui s'arrête actuellement au début de la saison d'arrosage, continuera au-delà pour arriver à un certain niveau hydrostatique, plus profond, compatible avec les conditions naturelles des Beni Amir.

Nous ne croyons pas, par contre, que l'abaissement de la nappe par les drains profonds, tels qu'ils existent actuellement dans le périmètre, puisse donner des résultats tangibles. Ils ont joué un grand rôle pour assécher la surface du sol et faire disparaître la zone des résurgences. Mais malgré le réseau assez serré de drains la nappe continue à rester près de la surface du sol dans une grande partie du périmètre (Yacoubia, secteur 8, secteur 13 dans les Beni Amir de l'est).

Pour rendre ces drains plus efficaces il serait probablement nécessaire de les approfondir, mais de toute façon l'abaissement de la nappe restera toujours limité au niveau même des drains.

Une fois le problème de l'abaissement de la nappe résolu il sera possible d'envisager le dessalage des sols qui réclament cette opération. En même temps il faudrait entreprendre l'organisation d'une expérimentation sérieuse aux Beni Amir, comportant, comme nous l'avions souhaité en 1944 :

1) la répétition, dans les conditions naturelles des essais faits au laboratoire (en 1940-1941) ;

2) l'étude de l'influence des volumes et de la fréquence des irrigations ;

3) l'étude de l'action des amendements et des engrais ;

4) la surveillance de la nappe.

Une partie de ce programme a reçu un début de réalisation, dès l'année 1956, à la Station expérimentale de Fquih Ben Salah sur les sols bruns à croûte graveleuse. Un autre essai sur le même type de sol est réalisé dans les cases lysimétriques à la Station Expérimentale de Rabat. Il s'agit ici d'étudier l'influence du volume d'eau, en présence ou en absence d'amendement (plâtre), sur l'évolution des sols sous l'effet de l'irrigation à l'eau salée ($NaCl = 1{,}5$ o/oo). Il faudrait pouvoir étendre ces essais à d'autres types de sols des Beni Amir.

Muni des renseignements à tirer de telles études on pourrait enfin envisager le programme et les étapes de l'amélioration des terres des Beni Amir.

G. BRYSSINE

Juillet 1957

TABLE

Pluviométrie et variations de la salure des e

ANNÉE	OBJET	VARIA						
		MENSUELLES						
		S	O	N	D	Jr	F	Ms
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1931-1932	Pluies en mm	6	90	20	13	36	163	174
	Pluies cumulées	6	96	116	129	165	328	501
	NaCl g/l	1.08	1.10	0.83	1.03	0.93	0.80	0.47
1932-1933	Pluies en mm	34	55	124	129	73	129	158
	Pluies cumulées	34	87	212	341	414	543	701
	NaCl g/l	1.03	1.00	0.98	0.97	1.03	0.96	0.35
1933-1934	Pluies en mm	12	75	291	324	3	55	167
	Pluies cumulées	12	87	378	702	705	760	927
	NaCl g/l	1.10	1.07	1.03	0.47	0.50	0.72	0.57
1934-1935	Pluies en mm	15	33	227	57	96	46	23
	Pluies cumulées	15	48	276	332	428	474	498
	NaCl g/l	0.90	0.83	0.63	0.48	0.61	0.57	0.68
1935-1936	Pluies en mm	16	103	53	56	82	121	185
	Pluies cumulées	16	119	172	238	320	441	626
	NaCl g/l	1.05	0.97	0.86	0.82	0.75	0.63	0.41
1936-1937	Pluies en mm	31	102	186	51	64	0	131
	Pluies cumulées	31	133	319	370	434	434	565
	NaCl g/l	1.40	1.23	1.27	0.68	0.47	0.60	0.83
1937-1938	Pluies en mm	84	202	?	144	54	25	74
	Pluies cumulées	84	286	?	430+?	484+?	509+?	583+?
	NaCl g/l	1.27	1.00	0.77	057	0.67	0.70	0.67
1938-1939	Pluies en mm	28	94	150	111	58	77	130
	Pluies cumulées	28	122	272	383	441	518	648
	NaCl g/l	1.15	1.03	0.91	0.72	0.71	0.71	0.57

)um-er-Rebia pendant les années 1931-1938

TIONS									
					SAISONNIÈRES				ANNUELLES
Av	M	J	Jt	At	A	H	D	E	
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
70	20	t	0	5	116	212	264	5	
572	592	592	592	597					597
0.38	0.68	0.86	0.90	0.97	1.00	0.92	0.51	0.91	0.84
26	45	22	10	31	212	331	228	6	
727	772	794	805	835					835
0.50	0.82	0.95	1.07	1.07	1.00	0.99	0.56	1.03	0.94
107	85	7	2	0	378	383	358	9	
1034	1121	1128	1130	1130					1.130
0.53	0.62	0.69	0.77	0.88	1.07	0.56	0.57	0.78	0.75
59	79	0	27	5	276	199	161	32	
556	636	636	663	668					668
0.83	0.92	0.80	0.88	1.05	0.79	0.55	0.81	0.91	0.77
119	210	2	5	13	172	269	532	20	
745	955	957	962	975					975
0.38	0.47	0.91	0.98	1.13	0.96	0.73	0.42	0.91	0.76
54	41	36	—	0	319	115	228	36	
619	660	696	696	696					696
1.07	1.07	1.22	1.30	1.37	1.30	0.59	0.99	1.29	1.04
170	101	3	0	0	286+?	223	345	3	
753+?	854+?	857+?	857+?	857+?					857+?
0.83	0.60	0.83	1.00	1.17	1.01	0.64	0.70	1.00	0.84
86	83	10	6	8	272	246	299	24	
734	817	827	833	841					841
0.65	0.74	0.85	0.99	1.09	1.01	0.71	0.65	0.97	0.84

PÉRIMÈTRE IRRIGUÉ DES BENI-AMIR. Emplacement des stations d'étude

Sk ehTleta des Beni Oukil
Dr Od Aïssa
Fkih ben Salah
Dr Od Naceur
Od Reguia
zone du canal
Oued Bou Regreg
Oued Oum er Rbia
Souk es Sebt

4d, 4c, 4b, 4a, 3d, 3c, 3b, 3a, 5a, 5b, 5c, 5d, 5e, 5f, 5g, 2d, 2c, 2b, 2a, 1d, 1c, 1b, 1a
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19

LÉGENDE

Canaux d'irrigation
Drains
Prélèvements d'eau
Prélèvements de terre

ÉCHELLE 1/200.000°

TABLEAU II

Comparaison entre la pluviométrie et la salure des eaux des années normales et des années d'observation 1955 et 1956

OBJET	ANNÉE	VARIATIONS																
		MENSUELLES												SAISONNIÈRE				ANNUELLES
		S	O	N	D	Jr	F	Ms	Av	M	J	Jt	At	A	H	P	E	
Pluies en mm	normale	32	81	119	121	85	95	99	100	64	23	8	11	232	301	263	42	838
	1931-1938	28	94	150	111	58	77	130	86	83	10	6	8	272	246	299	24	841
	1954-1955	1	34	33	61	146	229	164	59	29	21	0	7	68	436	252	28	784
	1955-1956	14	162	118	111	67	236	201	212	30	37	5	14	294	414	443	56	1.207
	1956-1957		19	55	0													
Pluies cumuleés en mm	normale	32	113	232	353	438	533	632	732	796	819	827	838	232	533	796	838	
	1931-1938	28	122	272	383	441	518	648	734	817	827	833	841	272	518	817	841	
	1954-1955	1	35	68	129	275	504	668	727	756	777	777	784	294	504	756	784	
	1955-1956	14	176	294	405	472	708	909	1.12,	1.151	1.188	1.193	1.207	68	708	1.151	1.207	
	1956-1957		19	74	74													
NaCl g/l	1931-1938	1.15	1.03	0.97	0.72	0.71	0.71	0.57	0.65	0.74	0.85	0.99	1.09	1.01	0.71	0.65	0.97	
	1954-1955	1.14	1.29	1.11		1.02	0.95	0.64	0.11	0.13	0.11	1.04	1.06			0.29	0.74	
	1955-1956	1.17	1.14	0.98	0.90	0.80	0.73	0.71	0.08	0.08	0.08	0.66	0.86	1.10	0.81	0.29	0.53	0.68 / 1955-0.77 1956-0.67
	1956-1957	1.00	0.98	0.98	1.13									0.99				

Observation. Salure moyenne du bief supérieur du canal d'irrigation II (points de prélèvement a.b. c.) avant son entrée dans la zone « salée » de Yacoubia.

TABLEAU III

Comparaison entre la salure des eaux du canal d'irrigation et celles des drains

ANNÉE	SUJET		J	F	Ms	Av	M	J	Jt	At	S	O	N	D	ANNÉE
1955	1. drain 9/10		2.00	1.73	1.59	0.22	0.23	0.20	1.38	1.37	1.41	1.41	1.38	1.43	1.20
	2. drain 10/11		1.50	1.67	1.73	0.68	0.18	0.20	1.46	1.62	1.51	1.50	1.50	1.52	1.26
	5. canal d'irrigation II	amont	1.02	0.95	0.64	0.11	0.13	0.11	1.04	1.06	1.17	1.14	0.98	0.90	0.77
		aval	1.24	1.55	1.46	0.11	0.12	0.10	1.09	1.13	1.22	1.25	1.02	1.36	0.97
		total	1.14	1.29	1.11	0.11	0.12	0.10	1.07	1.10	1.20	1.20	1.10	1.16	0.88
	3. drain 11/12		1.46	1.48	0.92	0.17	0.16	0.15	1.39	1.32	1.35	1.35	1.26	1.30	1.03
	4. drain 13/17-11		0.72	0.90	0.82	0.11	0.46	0.13	0.75	0.83	0.97	0.87	0.85	0.78	0.68
1956	1. drain 9/10		1.42	1.43	1.55	0.20	0.20	0.20	1.35	1.42	1.40	1.38	1.38	1.39	1.11
	2. drain 10/11		1.43	1.40	1.60	0.20	0.20	0.19	1.41	1.48	1.47	1.41	1.41	1.47	1.14
	5. canal d'irrigation II	amont	0.80	0.73	0.71	0.08	0.05	0.05	0.66	0.86	1.00	0.98	0.98	1.13	0.59
		aval	1.10	1.31	0.35	0.08	0.08	0.07	0.85	0.88	1.15	1.10	1.10	1.23	0.77
		total	0.97	1.06	0.50	0.08	0.06	0.06	0.77	0.87	1.09	1.05	1.05	1.19	0.730
	3. drain 11/12		1.46	0.96	1.29	0.20	0.19	0.34	1.38	1.43	1.40	1.33	1.33	1.46	1.06
	4. drain 13/17-11		0.83	0.74	0.77	0.16	0.14	0.15	0.76	0.80	0.87	0.81	0.81	0.96	0.65

TABLEAU IV

Détermination de la salure (en NaCl o/oo) et de l'humidité (en % de la terre sèche) des sols.
Valeurs moyennes annuelles des différentes soles

Salure en NaCl o/oo

PROFONDEUR	1 S-2	2 PPI	3 S-4	4 PBA	5 ALBA	6 S-6	7 S-10	8 S-13	9 S-7	10 PFO-1	11 Yakoub	14 S-8	14 S-17	15 PFO-4	16 SM	18 S-20
	STATIONS															
0-20	1.19	3.56	1.51	2.13	1.09	1.50	1.81	2.37	1.33	1.15	2.26	2.65	1.36	1.09	1.60	1.57
20-40	1.03	3.99	1.44	2.07	1.35	1.44	2.06	1.74	1.25	1.29	2.35	2.71	0.96	1.04	1.58	1.33
40-60	croûte	croûte	croûte	1.85	1.37	2.08	1.90	1.55	1.15	1.39	2.08	2.38	1.09	1.06	croûte	1.45
60-80	»	»	»	1.67	1.40	1.70	2.07	1.64	1.31	1.31	1.87	2.19	1.28	0.94	»	1.38
80-100	»	»	»	1.77	1.59	1.39	2.00	1.45	1.27	1.39	2.00	2.08	croûte	0,94	»	1.25
0-40	1.11	3.78	1.48	2.10	1.22	1.47	1.94	2.06	1.24	1.22	2.30	2.68	1.16	1.07	1.59	1.45
0-100				1.90	1.38	1.62	1.97	1.75	1.26	1.31	2.11	2.40	1.17	1.01		1.40
	Humidité %															
0-20	10,3	9.0	10.1		11.4	12.5	12.5	13.6	12.3	9.3	15.5	15.4	7.6	9.6	12.3	12.4
20-40	11.9	8.3	11.6		12.6	16.1	14.0	16.3	13.7	10.9	16.8	16.9	7.7	10.7	12.6	11.3
40-60	croûte	croûte	croûte		12.4	16.1	13.4	15.3	12.7	12.3	16.1	15.8	7.4	10.1	croûte	11.4
60-80	»	»	»		13.0	15.7	12.7	15.3	11.7	12.3	16.1	16.0	7.7	15.1	»	11.7
80-100	»	»	»		12.3	16.8	13.1	14.9	12.0	13.0	16.3	17.3		9.1	»	11.1
0-40	11.1	8.7	10.9		12.0	14.3	13.3	15.0	13.0	10.1	16.2	16.2	7.7	10.2	12.5	11.9
0-100					12.3	15.4	13.1	15.1	12.5	11.6	16.2	16.3	7.6	10.0		11.6

TABLEAU V

Détermination de la salure (en NaCl o/oo) et de l'humidité (en % t.s.) des sols des Stations
Valeurs moyennes annuelles des soles « jachère »

Salure en NaCl o/oo

PROFONDEUR	1 S-2	2 PPI	3 S-4	4 PBA	5 ALBA	6 S-6	7 S-10	8 S-13	9 S-7	10 PFO-I	11 Yak	12 S-8	14 S-17	15 PFO-4	16 SM	18 S-20
0-20	1.16	6.65	2.45	1.23	1.00	1.34	2.23		1.11	1.23		2.96	0.94	1.06	1.52	1.35
20-40	0.69	6.33	2.42	1.34	1.10	1.93	3.36		1.41	1.23		2.78	0.94	1.06	1.52	0.88
40-60	croûte	croûte	croûte	1.29	1.48	2.22	2.22		1.29	1.11		2.28	0.99	1.00	croûte	0.70
60-80	»	»	»	1.23	1.37	1.81	2.86		1.29	1.40		3.52	croûte	0.94	»	0.82
80-100	»	»	»	1.35	1.70	1.46	2.07		1.17	1.52		2.10		0.94	»	0.64
0-40	0.93	6.44	2.44	1.29	1.05	1.64	2.80		1.26	1.23		3.24	0.94	1.06	1.52	1.12
0-100				1.29	1.37	1.75	2.55		1.25	1.30		2.73	0.99	1.00		0.88
Humidité %																
0-20	6.7	12.3	8.0		8.4	12.8	12.5		9.2	8.2		14.7	4.4	9.2	12.2	10.3
20-40	10.0	8.7	10.6		11.8	15.6	14.4		13.6	10.1		17.7	7.1	10.3	13.1	10.2
40-60	croûte	croûte	croûte		12.3	15.8	14.0		10.5	10.0		16.7	7.4	10.5	croûte	11.4
60-80	»	»	»		13.2	15.5	12.3		9.5	10.1		16.3		10.5	»	12.1
80-100	»	»	»		12.1	16.3	12.2		11.2	10.5		17.1		9.1	»	12.2
0-40	8.4	10.5	9.3		10.0	14.2	13.5		11.4	9.2		16.2	5.8	9.8	12.7	10.3
0-100					11.5	15.2	13.1		12 9	9.8		16.5	6.3	9.9	—	11.2

TABLEAU VI

Détermination de la salure (en NaCl o/oo) et de l'humidité (en % t.s.) des sols des stations
Valeurs moyennes annuelles des soles « Céréales (blé) »

Salure en NaCl o/oo

	STATIONS															
PROFONDEUR	1 S-2	2 PPI	3 S-4	4 PBA	5 ALBA	6 S-6	7 S-10	8 S-13	9 S-7	10 PFO-1	11 Yak	12 S-8	14 S-17	15 PFO-4	16 SM	18 S-20
0.20	1.16	2.14	1.23	3.45	1.04	1.93	1.29	2.70	1.12	0.80	2.42	3.11	1.65	1.11	1.92	1.17
20.40	0.63	1.64	1.00	3.05	1.56	2.36	1.70	1.70	1.17	0.83	2.45	3.33	1.00	0.94	1.68	1.11
40-60	croûte	croûte	croûte	2.22	1.45	2.51	croûte	1.42	1.29	0.94	2.48	2.93	1.05	1.11	croûte	1.17
60-80	»	»	»	2.05	0.90	1.93		1.58	1.34	0.88	1.80	2.71	1.29	croûte	»	1.23
80-100	»	»	»	1.88	1.41	1.23		1.33	1.29	1.06	1.84	2.41	croûte	»	»	1.29
0-40	0.90	1.89	1.12	3.25	1.30	2.15	1.50	2.20	1.15	0.82	2.43	3.22	1.33	1.03	1.80	1.14
0-100				2.53	1.27	1.79		1.75	1.24	0.90	2.20	2.90	1.25	1.15		1.19

Humidité %

PROFONDEUR	1 S-2	2 PPI	3 S-4	4 PBA	5 ALBA	6 S-6	7 S-10	8 S-13	9 S-7	10 PFO-1	11 Yak	12 S-8	14 S-17	15 PFO-4	16 SM	18 S-20
0-20	9.9	5.9	12.2		10.8	13.5	11.2	16.5	9.2	8.2	14.1	15.7	5.5	8.7	10.8	10.8
20-40	13.8	8.0	11.4		12.0	16.3	13.6	16.3	11.4	9.7	14.9	15.9	5.1	10.8	12.8	9.6
40-60	croûte	croûte	croûte		11.8	16.3		15.0	12.0	11.2	12.7	15.6	7.7	10.2	croûte	10.7
60-80	»	»	»		12.02	16.0		14.9	11.6	11.3	14.3	15.4	7.7	croûte		11.2
80-100	»	»	11.8		11.2	18.7		15.0	10.7	11.0	15.5	15.5	croûte	»		11.1
0-40	11.8	6.9			11.4	14.9	12.4	16.4	10.3	8.9	14.5	15.8	5.3	9.7	11.8	10.2
0-100					11.5	16.1		15.5	11.0	10.3	14.3	15.6	6.5	9.9		10.7

TABLEAU VII

Détermination de la salure (en NaCl o/oo) et de l'humidité (en % t.s.) des sols des stations
Valeurs moyennes annuelles des soles « coton »

Salure en NaCl o/oo

STATIONS

PROFONDEUR	1 S-2	2 PPI	3 S-4	4 PBA	5 ALBA	6 S-6	7 S-10	8 S-13	9 S-7	10 PFO-1	11 Yak	12 S-8	14 S-17	15 PFO-4	16 SM	18 S-20
0-20	1.33		1.34		1.34		1.40	3.83	1.12	1.11	1.82	2.92	1.49			2.05
20-40	1.21		1.75		1.29		1.58	2.26	1.35	1.35	1.70	2.69	0.94			1.76
40-60	croûte	croûte	croûte		1.15		1.52	1.95	1.35	1.52	1.56	2.87	1.11		croûte	1.99
60-80	»	»	»		1.34		1.69	2.45	1.70	1.53	1.48	2.28	croûte			1.76
80-100	»	»	»		1.48			2.23	1.81	1.47	1.72	2.58	»			1.52
0-40	1.27		1.55		1.32		1.49	3.05	1.24	1.23	1.76	2.81	1.22			1.91
0-100					1.32		1.55	2.54	1.47	1.40	1.66	2.67	1.18			1.82
Humidité %																
0-20	14.0		11.3		12 9		11.5	9.7	16.3	11.5	15.6	16.3	10.8			15.3
20-40	13.6		12.1		13.9		12.3	17.4	14.4	16.4	16.7	18.3	10.9			13.5
40-60	croûte	croûte	croûte		13.8		11.9	14.9	14.1	17.3	16.0	17.4	7.5	croûte	croûte	12.3
60-80	»	»	»		13.9		11.9	14.4	12.9	20.3	15.2	19.8	croûte	»	»	12.6
80-100	»	»	»		12.2			15.0	13.1	20.2	15.4	20.1	»	»	»	8.0
0-40	13.8		11.7		13.4		11.9	13.5	15.3	14.0	16.1	17.3	10.8			14.4
0-100					13.4		11.9	12.8	14.1	17.1	15.8	18.4	9.7			12.7

TABLEAU VIII

Déterminations de la salure (en NaCl o/oo) et de l'humidité (en % t.s.) des sols des stations
Valeurs moyennes annuelles des soles « légumineuses (fèves) »

Salure en NaCl o/oo

	STATIONS															
PROFONDEUR	1 S-2	2 PPI	3 S-4	4 PBA	5 ALBA	6 S-6	7 S-10	8 S-13	9 S-7	10 PFO-1	11 Yak	12 S-8	14 S-17	15 PFO-4	16 SM	18 S-20
0-20	0.99		1.05		1.11			2.23	1.29		2.23	4.10		1.06		
20-40	1.11		1.11		1.50			1.81	1.41		1.93	2.52		1.12		
40-60	croûte	croûte	croûte		1.33			1.46	1.23		2.18	1.76		croûte	croûte	
60-80	»	»	»		1.40			1.29	1.17		2.11	1.99		»	»	
80-100	»	»	»		1.33			1.46	1.17		2.45	1.76		»	»	
0-40	1.05		1.08		1.31			2.02	1.35		2.08	3.31		1.09		
0-100					1.34			1.65	1.25		2.18	2.43				
Humidité %																
0-20	9.0		10.8		11.9			13.4	13.8		16.4	15.4		10.6		
20-40	9.3		12.5		12.4			15.0	13.8		16.9	15.8		10.7		
40-60	croûte	croûte	croûte		11.3			15.5	12.0		16.6	14.6		croûte	croûte	
60-80			»		12.5			16.4	12.4		16.1	14.6				
80-100			»		11.9			16.4	11.8		16.4	16.3				
0-40	9.1		11.6		12.2			14.2	13.8		16.7	15.6		10.7		
0-100					12.0			15.3	12.7		16.5	15.3				

TABLEAU IX

Détermination de la salure (en NaCl o/oo) et de l'humidité (en % t.s.) des sols des Stations
Valeurs moyennes annuelles des parcelles « luzerne » (hors assolement)

Salure en NaCl o/oo

PROFONDEUR	1 S-2	2 PPI	3 S-4	4 PBA	5 ALBA	6 S-6	7 S-10	8 S-13	9 S-7	10 PFO-1	11 Yak	12 S-8	13 S-17	14 PFO-4	15 SM	16 S-20
	STATIONS															
0-20	1.29	1.64	1.46		0.99	1.23	2.40	1.29	1.11		1.15	1.41		1.11	1.35	1.46
20-40	1.53	croûte	0.94		1.27	1.45	1.81	1.40	1.35		1.21	1.47		1.05	1.52	1.58
40-60	croûte	»	croûte		1.44	1.52	1.58	1.47	1.11		1.46	1.52		croûte	croûte	1.70
60-80	»	»	»		1.70	1.35	1.64	1.53	1.05		1.63	1.70		»	»	1.70
80-100	»	»	»		2.10	1.46	1.93	1.35	0.92		1.74	1.52		»	»	1.52
0-40	1.41	1.64	1.20		1.13	1.34	2.10	1.35	1.23		1.18	1.44		1.08	1.44	1.52
0-100					1.50	1.40	1.87	1.41	1.11		1.44	1.52				1.59
	Humidité %															
0-20	9.7	9.3	9.8		13.2	11.5	14.7	14.4	13.4		13.5	15.9		10.4	10.9	13.2
20-40	12.6		11.2		13.2	16.3	15.5	16.4	15.2		14.8	18.3		11.0	11.8	12.0
40-60	croûte	croûte	croûte		12.9	16.1	14.6	15.7	14.5		15.0	15.9		croûte	croûte	11.4
60-80	»	»	»		12.8	14.7	13.9	15.4	12.4		15.0	16.6		»	»	10.8
80-100	»	»	»		13.2	15.5	14.0	14.1	13.5		15.5	17.6		»	»	10.9
0-40	11.2	9.3	10.5		13.2	13.9	15.1	15.4	14.3		14.2	12.8		10.7	11.4	12.6
0-100					13.0	14.8	14.5	15.2	13.8		14.8	12.6				11.6

TABLEAU X

Répartition des stations d'essai suivant l'ordre décroissant des valeurs de la salure dans les horizons supérieurs (0-40)

STATION		NATURE DES SOLS	NAPPE Jv/55		SALURE DU SOL EN NaCl o/oo		HUMIDITÉ DES SOLS %		OBSERVATIONS
Appellation	N°		Prof. en m.	NaCl o/oo	0-40	0-100	0-40	0-100	
Beni Amir de l'est (à l'est de la route N° 22)									
PPI	2	sb r/cr	1.30	1.99	3.78	—	8.7	—	3 soles
S 8	12	sbcrg	0.90	2.34	2.68	2.40	16.2	16.3	
Yak	11	sb/lfe	0.75	1.87	2.30	2.11	16.2	16.2	
P B A	4	sb/l	1.30	1.87	2.10	1.90			
S 13	8	sb/lfe	1.05	1.70	2.06	1.75	15.0	15.1	
S 10	7	sbcrg	1.80	1.63	1.94	1.97	13.3	13.1	
S 4	3	sbcrn	1.5.2.6	2.10	1.48	—	10.9	—	
S 6	6	sb/lfe	1.50	1.80	1.47	1.62	14.3	15.4	
PPI	2	sb-r/crs	1.30	1.99	1.36	—	7.7	—	2 soles seulement sans jachère
S 7	9	sb/crg	2.70	1.75	1.24	1.26	13.0	12.5	
PFO-I	10	sb/crg	12.00	1.17	1.22	1.31	10.1	11.6	
ALBA	5	sb/lfe	3.45	2.17	1.22	1.38	12.0	12.3	
S 2	1	sb-r crs	prof	1.87	1.11	—	11.1	—	
Beni Amir de l'ouest (à l'ouest de la route n° 22)									
S.M	16	sb/crn	1.50	1.98	1.59	--	12.7	—	
S 20	18	sb/crg	3.60	0.70	1.41	1.40	10.3	11.2	irriguée par le drain
S 17	14	sbcrg	12.50	0.46	1.16	1.17	5.8	6.3	
PFO-4	15	sbcrg	prof	1.17	1.07	1.01	9.8	9.7	

sb : sol brun
r : rouge
/ : sur

cr : croûte
s : stalactiforme
g : graveleuse

l : limon
f e : fortement encroûté
n : nodulaire

TABLEAU XI

Répartition moyenne de NaCl (o/oo) et de l'humidité du sol dans les profils (de 1 m d'épaisseur)

		MOYENNES	AVRIL		JUIN		SEPTEMBRE		DÉCEMBRE		ANNUELLE	
NaCl o/oo	Sols salés (12, 11, 4, 8, 7)	0-20	1.75	1.93	2.37	2.29	2.18	2.26	2.41	2.28	2.24	2.22
		20-40	2.10		2.20		2.34		2.14		2.19	
		40-100	2.04		2.12		1.68		1.75		19.0	
	Sols peu salés (6, 9, 10, 5)	0-20	1.36	1.58	1.12	1.20	1.52	1.44	1.06	1.17	1.20	1.25
		20-40	1.80		1.28		1.35		1.27		1.29	
		40-100	1.82		1.28		1.40		1.37		1.49	
Humidité %	Sols salés (12, 11, 8, 7)	0-20	13.7	14.6	13.6	15.0	12.8	14.1	16.4	16.6	14.3	15.2
		20-40	15.4		16.5		15.4		16.8		16.0	
		40-100	14.3		15.9		14.5		15.9		15.2	
	Sols peu salés (6, 9, 10, 5)	0-20	14.3	14.5	10.8	11.6	7.8	10.0	13.1	13.7	11.4	12.4
		20-40	14.6		12.3		12.1		14.3		13.3	
		40-100	14.0		12.2		13.3		13.8		13.3	

TABLEAU XII

Valeurs moyennes annuelles de la salure et de l'humidité groupées suivant le type de culture

STATION		NATURE DES SOLS	NAPPE 1-55		SALURE DES SOLS EN NaCl o/oo		HUMIDITÉ DES HUMIDITÉ DES SOLS %	
Appelation	N°		Prof. en m	NaCl o/oo	0-40	0-100	0-40	0-100
Jachère								
Beni Amir de l'est								
PPI	5-2	sb r/crs	1.30	1.99	6.44	—	10.5	—
S-8	12	sb crg	0.90	2.34	3.24	2.73	16.2	16.5
S-10	7	sb crg	1.80	1.63	2.80	2.55	13.5	13.1
S-4	3	sb crn	1.5.2.0	2.10	2.44	—	9.3	—
S-6	6	sb/lfe	1.50	1.80	1.64	1.75	14.2	15.2
PBA	4	sb/l	1.30	1.87	1.29	1.29		
S-7	9	sb crg	2.70	1.75	1.26	1.25	11.4	12.9
PFO-1	10	sb crg	12.00	1.17	1.23	1.30	9.2	9.8
ALBA	5	sb/crg	3.45	2.17	1.05	1.37	10.0	11.5
S-2	1	sb/lfe	prof.	1.87	0.93	—	8.4	—
Beni Amir de l'ouest								
SM	16	sbr crs	1.50	1.98	1.52	—	12.8	—
PFO-4	15	sb crn	prof.	1.17	1.06	1.00	9.8	9.9
S-20	18	sb crg	13-60	0.70	1.12	0.88	10.3	11.2
S-17	14	sb crg	12.50	0.46	0.94	0.94	5.8	6.3
Céréales								
Beni Amir de l'est								
S-8	12	sb crg	0.90	2.34	3.22	2.90	15.8	15.8
PBA	4	sb crg	1.30	1.87	3.25	2.53	12.4	11.5
Yak	11	sb/lfe	0.75	1.87	2.43	2.20	14.5	14.3
S-13	8	sb/lfe	1.05	1.70	2.20	1.75	16.4	15.5
S-6	6	sb/lfe	1.50	1.80	2.15	1.79	14.9	16.1
PPI	2	sbr/crs	1.30	1.99	1.89	—	6.9	—
ALBA	5	sb/lfe	3.45	2.17	1.30	1.27	12.4	11.5
S.10	7	sb/crg	1.80	1.63	1.50	—	12.4	—
S.7	9	»	2.70	1.75	1.15	1.24	10.3	11.0
S-4	3	»	1.5-2.0	2.10	1.12	—	11.8	—
S-2	1	sb rcrs	prof.	1.87	0.90	—	11.8	—
PFO-1	10	sb-crg	12.00	1.17	0.82	0.90	8.9	10.3
Beni Amir de l'ouest								
SM	16	sb crn	1.50	1.98	1.80	—	11.8	—
S-17	14	sb/crg	12.50	0.76	1.33	1.25	5.3	6.5
S-20	18	»	3.60	0.70	1.14	1.19	10.2	10.7
PFO-4	15	»	prof.	1.17	1.03	1.15	9.7	9.9

sb : sol brun — cr : croûte — l : limon
r : rouge — s : stalactiforme — f e : fortement encroûté
/ : sur — g : graveleuse — n : nodulaire

TABLEAU XII (suite)

Valeurs moyennes annuelles de la salure et de l'humidité groupées suivant le type de culture

STATION		NATURE DES SOLS	NAPPE 1-55		SALURE DES SOLS EN NaCl o/oo		HUMIDITÉ DES SOLS %	
Apellation	N°		Prof. en m.	NaCl o/oo	0-40	0-100	0-40	0-100
Coton								
Beni Amir de l'est								
S-13	8	sb/lfe	1.05	1.70	3.05	2.54	13.5	12.8
S-8	12	sbcrg	0.90	2.34	2.81	2.67	17.3	18.4
Yak	11	sb/lfe	0.75	1.87	1.76	1.66	16.1	15.8
ALBA	5	» 1	3.45	2.17	1.32	1.32	13.4	13.4
S-10	7	sbcrg 2	1.80	1.63	1.49	1.55	11.9	11.9
S-4	3	» 3	1.5.200	2.10	1.55	—	11.7	—
S-2	1	sbcrs	prof.	1.87	1.27	—	13.8	—
S-7	9	sbcrs	2.70	1.75	1.24	1.47	15.3	12.8
PFO-I	10	»	12.00	1.17	1.23	1.40	14.0	17.1
Beni Amir de l'ouest								
S-20	18	sbcrg	3.60	0.70	1.91	1.82	14.4	12.7
S-17	14	»	12.50	0.46	1.22	1.18	10.8	9.7
Légumineuses								
Beni Amir de l'est								
S-8	12	sbcrg	0.90	2.34	3.31	2.43	15.6	15.3
Yak	11	sb/lfe	0.75	1.87	2.08	2.18	16.7	15.3
S-13	8	»	1.05	1.70	2.02	1.65	14.2	16.5
S-7	9	sbcrg	1.80	1.63	1.35	1.25	13.8	12.7
ALBA	5	sb/lfe	3.45	2.17	1.31	1.34	12.2	12.0
S-4	3	sbcrg	1.5.2.0	2.10	1.08	—	11.6	—
S-2	1	sbcrs	prof.	1.87	1.05	—	9.1	—
Beni Amir de l'ouest								
PFO-4	15	sbcrg	prof.	1.17	1.09	—	10.7	—
Luzerne								
Beni Amir de l'est								
S-10	7	sbrcrs	1.80	1.63	2.10	1.87	15.1	14.5
PPI	2	sbcrg	1.30	1.99	1.64	—	9.3	—
S-8	12	sbrcrs	0.90	2.34	1.44	1.52	12.8	12.6
S-2	1	sblfe	prof.	1.87	1.41	—	11.2	—
S-13	8	sbcrg	1.05	1.70	1.35	1.41	15.4	15.2
S-7	9	sbcrg	2.70	1.75	1.23	1.11	14.3	13.8
Yak	11	sb/lfe	0.75	1.87	1.18	1.44	14.2	14.8
S-4	3	sbcrn	1.5.2.0	2.10	1.20	—	10.5	—
S-6	6	sb/lfe	1.50	1.80	1.34	1.40	13.9	14.8
ALBA	5	sb/lfe	3.45	2.17	1.13	1.50	13.2	13.0
Beni Amir de l'ouest								
S-20	18	sbcrn	3.60	0.70	1.52	1.59	12.6	11.6
S.M	16	sbcrn	1.50	1.59	1.44	—	11.4	—
PFO-4	15		prof.	1.17	1.08	—	10.7	—

TABLEAU XIII

Variations moyennes de la salure (en NaCl) au cours de l'année suivant le type de culture

ST	HORIZONS	ANNUELLES		AVRIL		JUIN		SEPTEMBRE		DÉCEMBRE	
					Jachère						
salés 1)	0-20	2.17	2.55	1.64	1.95	1.79	2.11	2.21	3.13	3.05	3.01
	20-40	2.93		2.26		2.42		4.05		2.97	
	40-100	2.19		2.34		2.55		1.83		2.10	
peu salés 2)	0-20	1.17	1.27	0.94	1.20	0.82	0.94	1.69	1.49	1.18	1.24
	20-40	1.37		1.45		1.05		1.29		1.29	
	40-100	1.31		1.44		1.40		1.39		1.23	
					Céréales						
salés 3)	0-20	2.63	2.51	2.19	2.38	2.58	2.53	3.48	2.88	2.52	2.44
	0-20	2.39		2.57		2.47		2.28		2.35	
	40-100	1.85		2.38		1.89		1.55		1.90	
peu salés 4)	0-20	0.99	1.09	1.38	1.38	0.99	1.08	0.78	1.09	0.78	0.78
	20-40	1.18		1.38		1.17		1.40		0.78	
	40-100	1.17		1.74		1.17		1.17		0.86	
					Coton						
salés 5)	0-20	3.38	2.93	5.60	5.73	2.94	2.93	2.47	2.23	3.75	2.99
	20-40	2.48		5.85		2.92		1.99		2.22	
	40-100	2.39		4.56		2.15		1.89		2.34	
peu salés 6)	0-20	1.36	1.46	1.58	1.54	1.40	1.31	1.41	1.48	1.03	1.29
	20-40	1.45		1.50		1.22		1.55		1.55	
	40-100	1.53		1.52		0.96		1.58		1.75	
					Légumineuses						
salés 7)	0-20	2.85	2.47	1.64	1.52	3.20	2.85	3.58	2.92	2.97	2.58
	20-40	2.08		1.40		2.50		2.26		2.18	
	40-100	1.82		1.74		2.00		1.56		1.69	
peu salés 8)	0-40	1.20	1.33	1.60	1.72	1.17	1.12	1.29	1.53	0.74	0.90
	20-40	1.46		1.84		1.06		1.76		1.06	
	40-100	1.27		1.89		1.17		1.33		0.70	
					Luzerne						
salés 9)	0-20	2.40	2.11	1.40	1.40	5.40	3.87	1.40	1.29	1.40	1.87
	20-40	1.31		1.40		2.34		1.17		2.34	
	40-100	1.71		1.41		2.10		1.17		2.18	
peu salés 10)	20-40	1.20	1.28	1.28	1.44	1.17	1.25	1.25	1.17	1.09	1.15
	20-40	1.36		1.59		1.32		1.33		1.21	
	40-100	1.48		1.66		1.60		1.31		1.31	

1) Stations 6, 7, 12
2) Stations 4, 5, 9, 10
3) Stations 4, 6, 8, 11
4) Stations 5. 9, 10
5) Stations 8, 12
6) Stations 5, 7, 9, 10, 11
7) Stations 7, 1, 12
8) Stations 5, 9
9) Station 7
10) Stations 5, 6, 8, 9, 11, 12

TABL

Caractères analytiq

STATIONS	CARACTÈRES DE LA NAPPE				CULTURE		INDICE	Sq. %	MATIÈRE ORGANIQUE		COMPLEXE ABSORBANT			
	Profondeur		Salure						HUMUS o/oo	N o/oo	CEB	Bases échangeables		
	1955	1956	1955	1956								Ca	Mg	Na
Secteur 4	3.20	1.80	0.23	0.20	Jach.	Jach.	j	12	2.24	1.62	19	83	13	2
					Fèves	Blé	f	21	2.39	1.64	20	45	51	3
					Blé	Blé	b	11	2.24	1.52	16	66	29	3
					Coton	Blé	c	12	1.98	1.34	23	62	7	29
					Luz.	Luz.	l	19	2.48	1.64	22	82	14	2
Secteur 10	1.75	1.30	0.30	0.18	Jach.	Jach.	j	5	2.02	1.44	27	76	15	6
					Blé	Jach.	b	6	1.86	1.21	25	72	22	3
					Coton	Blé	c	5	1.70	1.32	25	64	28	5
					Luz.	Luz.	l	9	1.86	1.49				
P.F.O. 1	5.00	5.50	0.35	1.12	Jach.	Blé	j	8	1.32	1.26	23	77	17	3
					Blé	Blé	b	6	1.76	1.45	26	71	22	4
					Coton	Jach.	c	11	2.40	1.22	37	83	13	2
					Ment.	Jach.	M	17	1.70	1.20	24	93	0	3
					Verger	Verger	V	4	2.52	1.89	27	82	12	1
Yakoubia	1.00	1.05	0.35	1.12	Teal	Jach.	t	0	2.33	1.66	24	55	30	8
					Fèves	Blé	f	0	2.40	1.65	29	68	26	4
					Blé	Blé	b	0	2.32	1.45	25	53	37	5
					Coton	Blé	c	0	2.12	1.44	23	66	25	5
					Luz.	Luz.	l	0	1.90	1.26	21	85	9	3
Secteur 17	—	4.80	—		Jach.	Jach.	j	6	2.34	1.52	26	80	15	1
					Blé	Blé	b	9	2.19	1.62	30	91	7	4
					Coton	Blé	c	6	2.43	1.61	25	80	12	4
S.M.	1.50	1.05	0.15	0.11	Jach.	Jach.	j	18	2.22	1.33	19	67	27	2
					Blé	Blé	b	17	2.11	2.53	21	67	27	2
					Luz.	Luz.	l	20	1.95	1.27	19	82	12	2
Secteur 20	5	8.15	—	0.22	Jach.	Jach.	j	6	1.59	1.35	22	74	22	2
					Blé	Blé	b	6	1.52	1.15	20	61	29	9
					Coton	Blé	c	8	1.64	1.14	24	67	30	1
					Luz.	Luz.	l	6	1.54	1.20	24	80	17	1
Secteur 11	—	—	—	—	Fèves	Blé	f	6	1.70	1.36	22	35	58	3
					Blé	Blé	b	9	1.64	1.33	17	54	39	2
					Coton	Blé	c	5	1.87	1.35	21	50	44	2
					Luz.	Luz.	l	6	1.81	1.37	21	41	51	[illegible]

Sq — squelette (cailloux) ; C.E.B. — Capacité d'écharge des bases ; N — Azote ; Gaf — grosseur moyenne des agrégats « fi
A — pourcentage des mottes ; Gm — grosseur moyenne des mottes ; Pmh — porosité matière humide ; Pms — p

AU XIV

s des Stations d'étude

Gaf	POROSITÉ Pt	100 Pf / Pt	Pf / Pg	MACROSTRUCTURE Gt	A	Gm	Pmh / Pms	STABILITÉ 100 Lip / Pms	100 Lsp / Pt	100 Lf / Pt	PERMÉABILITÉ K 1955	1956	DENSITÉ d 1955	1956
0.54	47	70	2.35	0.85	63	1.29	0.95	66	79	97	7.5	8.0	1.46	1.56
0.39	50	57	1.04	0.63	64	0.93	—	—	69	90	10.8	14.5	1.37	1.45
0.35	51	60	1.55	0.79	58	1.29	—	—	70	108	6.7	15.1	1.51	1.43
0.43	50	57	2.33	0.67	60	1.06	0.86	69	68	111	13.1	8.0	1.52	1.48
0.55	63	39	0.65	0.59	68	0.82	—	—	49	68	1.1	1.6	1.51	1.12
0.18	51	69	2.18	0.70	69	0.98	1.14	79	73	135	2.8	4.0	1.28	1.45
0.41	51	71	2.40	1.31	75	1.72	1.26	96	85	117	17.4	19.8	1.25	1.46
0.54	51	69	2.18	1.30	76	1.67	1.01	76	83	130	3.4	3.0	1.45	1.43
0.48	50	68	2.12	1.71	83	2.04	0.96	81	73	120	9.4	9.0	1.43	1.46
0.30	53	57	1.03	0.50	52	0.87	0.77	97	59	121	5.4	6.5	1.38	1.39
0.28	57	54	1.01	0.58	57	0.94	0.83	99	57	104	10.0	18.0	1.34	1.28
0.31	55	59	1.39	0.92	65	1.37	0.99	102	52	102	12.8	12.1	1.34	1.35
0.32	49	75	3.08	0.68	54	1.20	0.93	96	59	121	5.7	5.4	1.38	1.56
0.22	60	46	0.87	0.22	33	0.49	—	—	54	—	10.3	12.1	1.12	1.20
0.56	46	96	2.20	2.00	83	2.38	1.47	112	118	179		15.0	1.27	1.56
0.31	59	50	0.95	0.39	47	0.74	0.87	73	65	87	4.3	3.8	1.25	1.21
0.43	51	73	2.64	1.54	79	1.94	1.22	93	85	134	0.9	3.0	1.40	1.52
0.41	49	79	3.90	1.36	81	1.65	1.18	95	96	152	1.2	1.2	1.39	1.43
1.08	49	71	2.50	1.04	80	1.28	1.10	90	89	140	0.9	0.9	1.45	1.52
0.19	46	75	2.83	0.52	58	0.84	0.69	54	85	146	2.4	2.2	1.24	1.56
0.24	59	49	0.96	0.37	44	0.73	—	75	59	95	5.8	7.1	1.12	1.21
0.35	49	72	2.64	0.91	66	1.32	1.06	—	69	124	0.5	1.2	1.27	1.46
1.50	52	58	1.36	0.35	41	0.74	—	—	60	111	9.6	9.6	1.37	1.43
0.86	61	41	0.69	0.24	29	0.61	—	—	44	97	4.8	5.5	1.40	1.56
1.65	48	72	2.69	1.52	63	2.38	0.87	93	82	132	4.7	4.0	1.40	1.17
0.24	58	47	0.87	1.12	78	1.44	1.01	80	51	88	14.6	15.2	1.21	1.25
0.28	49	53	1.13	0.94	60	1.52	0.84	76	68	109	14.6	17.2	1.22	1.56
0.27	48	76	3.00	2.19	77	2.81	1.20	89	80	104	7.9	8.3	1.18	1.55
0.25	48	74	2.69	1.95	81	2.38	1.09	88	92	146	3.4	4.1	1.28	1.54
0.53	55	50	0.96	0.82	68	1.16	0.92	73	60	104	—	—		
0.40	60	42	0.71	0.82	71	1.12	0.78	61	53		—	—		
0.27	52	56	1.26	0.96	72	1.29	0.89	67	68	132	—	—		
0.34	56	55	1.25	1.25	84	1.46	1.01	67	62	123	—	—		

ifs » ; Pt — Porosité totale ; Pf porosité fine ; Pg — porosité grossière ; Gt — grosseur moyenne des fractions de tamisage ;
orosité matière sèche ; Lip — limite inférieure de plasticité ; Lsp — limite supérieure de plasticité ; Lf — limite de fluidité.

TAB

Caractères moyens analytiq

STATION D'ESSAI	SQUELETTE	MATIÈRE ORGANIQUE		COMPLEXE ABSORBANT					AGRÉGATION Gaf	POR	
		TOTALE c % 72	N o/oo	CEB méq.	BASES ÉCHANGEABLES					P	100
					Ca	Mg	Na	K			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Secteur 4	15	2.26	1.55	20	68 2)	23 2)	8 3 3)	2	0.45	52	5
Secteur 10	5	1.86	1.36	26	71	22	5 3)	3	0.40	51	6
P.F.O. 1	9	1.94	1.40	27	81	13	3	3	0.29	55	5
Yakoubia	0	2.21	1.49	24	65 61 1)	25 30 1)	5	4	0.56	50	7
Secteur 17	7	2.32	1.71	27	84	11	3	3	0.26	51	6
S.M.	18	2.09	1.58	20	72	22	2	3	1.34	54	5
Secteur 20	7	1.57	1.21	23	71	25	3	3	0.26	51	6
Secteur 11	7	1.75	1.35	20	45	48	3	3	0.39	56	5
Moyenne		2.00	1.41	23	69	24	4	3	0.47	52	6
N. 236		1.98	1.34	22	76	19	1	4	0.47	54	4
N. 237		2.07	1.30	20	82	13	3	2	0.36	54	4
N. 238		2.09	1.66	25	82	11	3	4	0.35	60	2

1) Sauf parcelle de luzerne pauvre en Mg échangeable et riche en Ca. 2) Teneur en Mg très variable.

AU XV

des sols des stations d'étude

TÉ	ÉTAT D'AGGLOMÉRATION					STABILITÉ		PERMÉABILITÉ		DENSITÉ	
Pf / Pg	Gt	A	Gm	Pmh / Pms	100 Lip / Pms	100 Lsp / Pt	100 Lf / Pt	K		d	
								1955	1956	1955	1956
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1.26	0.70	63	1.08	—	—	67	95	7.8	9.4	1.47	1.41
2.19	1.19	76	1.60	1.09	83	79	126	8.3	9.0	1.35	1.45
1.39	0.58	52	0.98	0.86	99	56	115	8.8	10.8	1.31	1.37
2.85	1.27	74	1.60	1.17	93	91	138	4.8	8.3	1.35	1.45
1.94	0.60	56	0.96	0.86	65	71	122	2.9	3.5	1.21	1.41
1.25	0.70	44	1.24	0.87	—	62	113	6.3	6.4	1.39	1.39
1.68	1.55	74	2.04	1.04	83	73	119	10.1	11.2	1.22	1.48
1.07	0.96	74	1.26	0.90	67	61	120	—	—	—	1.32
1.60	0.96	65	1.35	1.00	83	70	117	6.8	8.1	1.34	1.41
0.93	1.16	61	1.86	0.71	53	52	67			1.27	
0.86	0.20	25	0.80	0.50	53	51	69			1.27	
0.40	0.13	25	0.53	0.39	27	43	58			1.10	

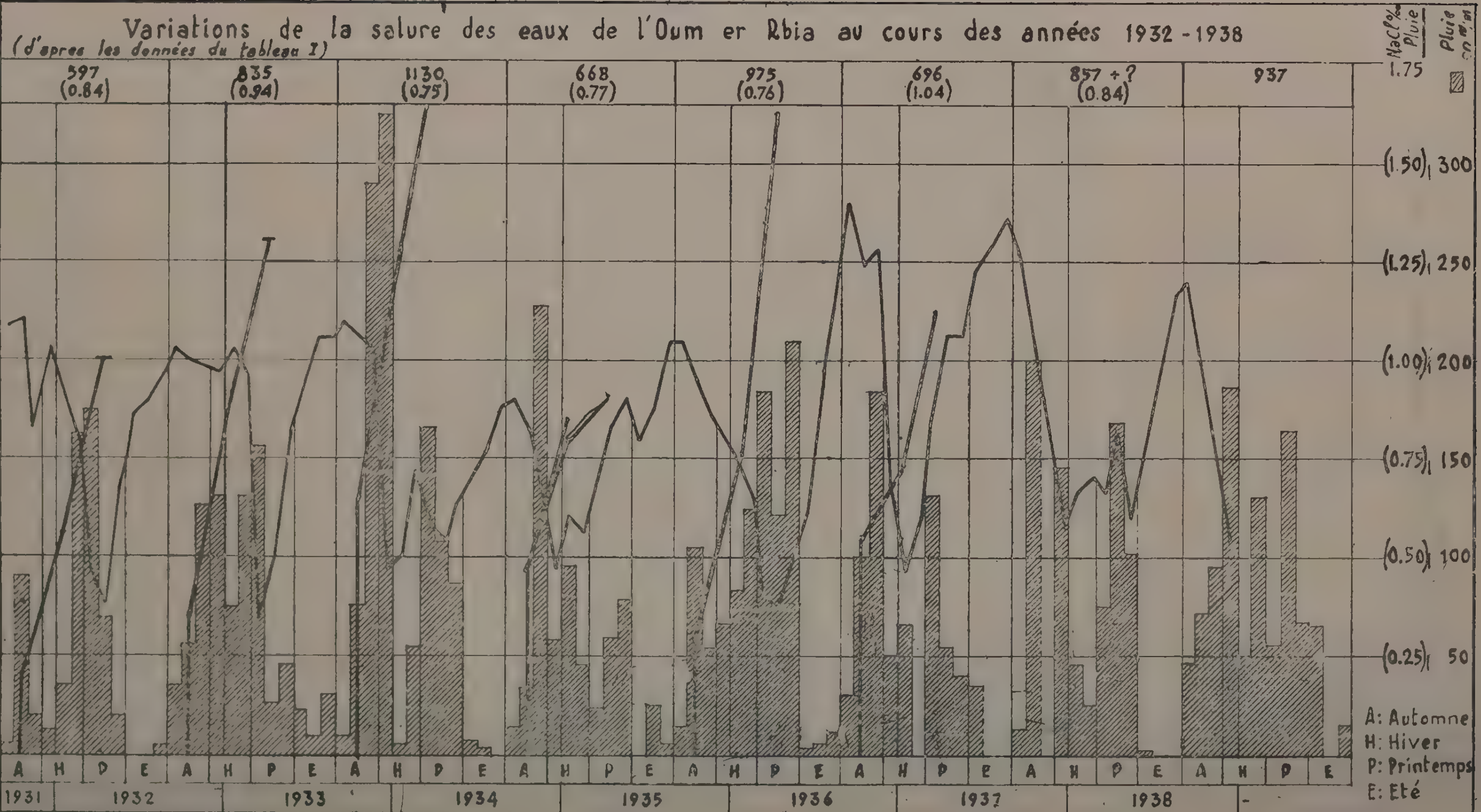
3) Sauf parcelle de coton riche en Na échangeable 29 % de la CEB.

TABLEAU XVI

Propriétés hydriques et porosité

	HM	Lv	LA	HE	Lsp	LA	Pt	Pm
N-409	7	24	26	30	36	53	50	39
N-418	7	23	26	29	33	51	51	40
N-412	5	19	22	23	27	36	52	32
N-413	7	22	25	27	31	50	55	45
sect 11	7	20	22	25	30	51	56	42
N-425	7	22	24	28	30	49	51	44
N-428	6	21	24	25	28	44	51	38
N-420	6	20	23	25	27	45	54	44
Moyenne	6	21	24	27	31	47	52	49
N-236	8	18	21	24	26	32	54	45
N-237	6	19	20	22	24	32	54	47
N-238	8	18	22	24	27	35	60	60

GRAPHIQUE I



Variations de la salure des eaux de l'Oum er Rbia au cours des années 1932-1938
(d'après les données du tableau I)
597 (0.84)
835 (0.94)
1130 (0.75)
668 (0.77)
975 (0.76)
696 (1.04)
857 + ? (0.84)
937
NaCl% / Pluie
Pluie en m/m
1.75
(1.50) 300
(1.25) 250
(1.00) 200
(0.75) 150
(0.50) 100
(0.25) 50
A H P E
1931
1932
1933
1934
1935
1936
1937
1938
A: Automne
H: Hiver
P: Printemps
E: Eté

TABL

Comparaison des caractères analytic

	MATIERE ORGANIQUE		COMPLEXE ABSORBANT					Gaf	POROSITE	
	Totale Cx 1,72	N	CEB	BASES ÉCHANGEABLES Ga	Mg	Na	K		Pt	100 Pf / Pt
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Jachère	2.02	1.44	22	75	19	3	2	0.62 0.32 3)	52	61
Fèves	2.16	1.55	24	49	45	3	2	0.41	55	52
Blé	1.95	1.48	21	62	31	4	3	0.47 0.39 3)	54	57
Moyenne	2.02	1.48	22	63	30	4	2	0.50 0.38	53	57
Coton	1.86	1.32	23	62	27	8 3 2)	3	0.38	50	68
Moyenne	1.98	1.44	22	63	28	5 3)	3	0.47 0.38 3)	53	60
Luzerne	1.92	1.37	21	74 82 1)	21 13 1)	2	2	0.73 0.54 3)	53	63 68 4)
Moyenne	1.96	1.42	22	65 66 1)	26 25 1)	5 3	2	0.53 0.42 3)	53	61 62 4)

1) Sauf parcelle de luzerne pauvre en Mg échangeable et riche en Ca. 2) Teneur

EAU XVII

ues des sols suivant le type de culture

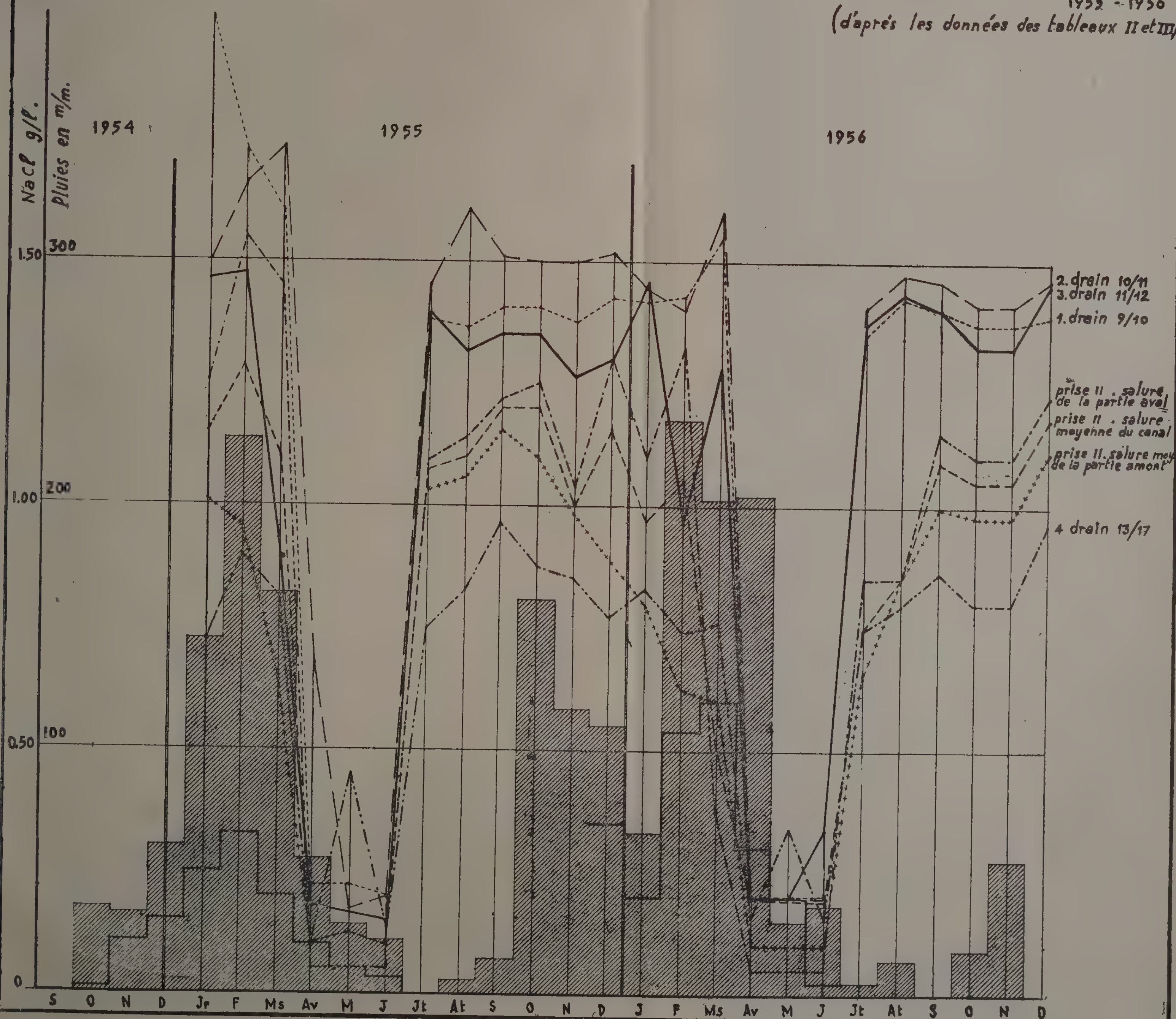
	ETAT D'AGGLOMERATION					STABILITE		PERM K		DENSITE D	
Pf / Pg	Gt	A	Gm	Pmh / Pms	100 Lip / Pms	100 Lsp / Pt	100 LF / Pt	1955	1956	1955	1956
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1.69	0.76 0.89 1)	63 70 3)	1.11 1.24 3)	1.08	75	66 68 3)	108 107 3)	8.6	9.2	1.33	1.45
1.13	0.61	60	0.94	0.90	73	65	94	7.6	9.2	1.31	1.35
1.52	0.94 1.08 3)	62 69	1.37 1.52 3)	1.03	80	75 72 3)	113 117 3)	8.9	12.1	1.33	1.46
1.48	0.81 0.91	62 67 3)	1.19 1.28 3)	1.05	77	66 69 3)	106 107 3)	8.5	10.5	1.33	1.42
2.41	1.30	73	1.70	1.03	79	79	129	6.4	5.1	1.39	1.47
1.63	0.94 1.02 3)	65 69	1.33 1.41 3)	1.01	78	70 72 3)	113 114 3)	8.0	9.1	1.34	1.43
2.03 2.31 3)	1.34 1.31 3)	80 79 3)	1.73 1.60 3)	1.01	85	75 73 3)	121 123 3)	3.9	3.9	1.41	1.35
1.73 1.78 3)	1.04 1.09 3)	69 71 3)	1.43 1.46 3)	1.01	80	71 72 3)	116 116 3)	7.0	7.8	1.36	1.42

en Mg très variable. 3) Sauf parcelle de coton riche en Na échangeable 29 % de la CEB.

GRAPHIQUE II

Variations moyennes mensuelles de la salure des eaux du canal d'irrigation (prise 11) et des drains au cours des années 1953 - 1956

(d'après les données des tableaux II et III)



GRAPHIQUE III

Variations moyennes de la salure des eaux le long du canal d'irrigation (prise 11) et des drains au cours des années 1955 et 1956

1955

NaCl ‰ canal principal

1.5 — 1.00 — 0.5

Ahl Merbaa — Ouled Reguia — Yacoubia — Route principale n° 22

1.68 — 1.17 — 1.22 — 1.12 — 1.20 — 1.19 — 1.22 — 1.12 — 1.06 — 1.11 — 0.99

1 colature 9/10

2. colature 10/11

3 colature 11/12

4. drain 13/17-11

0.77 — 0.79 — 0.75 — 0.95 — 0.96 — 1.00 — 0.94 — 0.96

→ Oum er Rbia

a b d d d c c c b d c d c a b b e b f g a a a

1956

NaCl ‰ canal principal

1.5 — 1.00 — 0.5

Ahl Merbaa — Ouled Reguia — Yakoubia — R.P. n° 22

1.44 — 1.08 — 1.10 — 1.11 — 1.12 — 1.25 — 1.15 — 1.28 — 1.15 — 1.15 — 0.96

1. colature 9/10

2 colature 10/11

3. colature 11/12

4. drain 13/17-11

0.86 — 0.68 — 0.66 — 0.76 — 0.73 — 0.75 — 0.77 — 0.86

→ Oum er Rbia

a b d d d c c c b d c d c a b b e b f g a a a

APERÇU DES SOLS DU LOTISSEMENT DE MECHRA BOU DERRA (SIDI SLIMANE)

Le lotissement de Mechra Bou Derra est situé dans le périmètre irrigué de Sidi Slimane, à une huitaine de kilomètres au nord de cette dernière localité et en bordure de la basse plaine du Rharb, entre celle-ci et l'oued Beth.

Au début de l'année 1954 les Services agricoles régionaux de Rabat ont demandé au Service de la Recherche Agronomique d'entreprendre l'étude de ce lotissement, où l'on avait constaté depuis quelques années le dépérissement progressif des cultures, agrumes et vigne. Le dépérissement s'était manifesté d'abord en différents points du périmètre, formant des taches disséminées dans la partie nord du lotissement, surtout dans les lots 1, 2 et 7 (voir carte I).

Au cours de l'été 1954 l'auteur procéda à la reconnaissance pédologique de cette zone *. La situation, qui avait paru s'améliorer au cours de l'hiver 1954-1955, après le creusement du réseau de drains et en particulier du grand drain situé entre le lotissement de Mechra Bou Derra et la rizière de la Compagnie Asiatique située au nord, s'aggrava de nouveau pendant l'été 1955. M. Tahiri, qui reprit alors la prospection pédologique de ce lotissement, put constater la disparition presque complète de la vigne du lot 2 et l'extension des taches dans les plantations d'agrumes. Appelé à d'autres fonctions au début de 1956, il dut cesser le travail dans ce périmètre.

Quoique les données dont nous disposons soient incomplètes à cause de l'interruption des études, il nous a paru intéressant d'exposer les résultats des prospections pédologiques en commentant les analyses des échantillons de terre prélevés. La zone étudiée correspond aux lots 1, 2 et 7, les plus touchés par le dépérissement des plantes.

DESCRIPTION DU LOTISSEMENT

Description géographique

Le lotissement de Mechra Bou Derra s'étend sur la rive droite de l'oued Beth (voir carte I) entre les cotes 20 et 24. Relativement uniforme à l'ouest (lots 1 et 2), la surface du sol devient assez ondulée à l'est

* Les prélèvements d'échantillons du sol ont été effectués par M. J. Desmeules.

(lot 7), où l'on rencontre de larges dépressions (deux à l'intérieur du lot 7) séparées par des crêtes ; un véritable thalweg traverse d'ailleurs du sud au nord ce même lot. A l'est du lot 7 on passe progressivement à la basse plaine du Rharb, couverte de tirs et drainée à la surface, dans cette zone, par l'oued El Hamma.

A l'ouest le lotissement est limité par le lit profond de l'oued Beth (cote de 12 m). Une sorte de crête, orientée du sud au nord, bien individualisée dans les lots 2 et 3 et qui s'abaisse ensuite progressivement vers le nord, sépare les versants des oueds Beth et El Hamma.

Constitution géologique

Cette partie de la plaine du Rharb est formée des dépôts alluvionnaires de l'oued Beth qui, à une époque assez récente, a dû se perdre dans les dépressions marécageuses du Rharb en formant une sorte de delta. Ces alluvions récentes et superficielles paraissent recouvrir les anciennes formations argileuses, visibles en profondeur dans les tranchées creusées dans la partie nord du lotissement (voir le graphique I, coupes géologiques). Au centre du lotissement ces alluvions sont représentées par une formation complexe limono-sableuse en forme de lentille, laquelle semble constituer la crête sud-nord des lots 2 et 3 déjà cités. Très sableuse et grossière dans la partie ouest du lotissement, vers l'oued Beth, elle devient moins riche en sable grossier vers l'est. A la périphérie cette lentille limono-sableuse est recouverte par des dépôts limoneux, sableux à la base, plus argileux vers le haut, tandis que les dépressions du lot 7 sont emplies par des formations fortement argileuses.

Ce schéma de la répartition des dépôts dans le sous-sol du lotissement est plus compliqué en réalité, ce qui est normal dans une basse plaine d'alluvionnements, où plusieurs lentilles, tantôt plus sableuses, tantôt plus argileuses, s'intercalent à faible distance.

Eaux souterraines

La nappe souterraine, qui n'était pas très profonde durant l'été 1955 (à 1,84 m en moyenne au-dessous de la surface du sol au mois de juillet), présentait quelques particularités (voir cartes II et III : nappe souterraine). Au lieu de s'abaisser, soit vers le nord en direction des merja de la plaine du Rharb, soit vers le sud ou vers l'ouest, en direction de l'oued Beth, elle se présentait alors comme une sorte de dôme, dont le sommet était situé entre les lots 3 et 4 (voir cartes II et III et tableau I). Les flancs de

ce dôme plongeaient assez brusquement vers le NNE, plus doucement vers le sud-ouest (lit de l'oued Beth) et vers le sud-est (voir graphique II). Dans cette partie sud-est du périmètre la surface de la nappe formait une sorte de gouttière correspondant à l'alignement des puits A et B. Au-delà de cet alignement la surface de la nappe remontait vers le SSE.

Les prélèvements du mois de novembre de la même année 1955 montrent que l'allure générale de la nappe restait à peu près la même, mais son niveau s'était abaissé depuis le mois d'août, de 0,44 m en moyenne (cote moyenne = —2,25 m). Cette fluctuation de la nappe semble être en relation avec les irrigations pratiquées dans ce lotissement.

En ce qui concerne la salure de la nappe, celle-ci est caractérisée par la prédominance des ions chlore (64 % en moyenne) et sodium (77 %), dont les taux dépassent respectivement ceux des autres anions et cations (voir tableau I). On remarque aussi la pauvreté de ces eaux en calcium (6-7 %) et leur richesse relative en magnésium (16-17 %). Parmi d'autres anions, les sulfates (14-18 %) et le bicarbonate (10-14 %) se trouvent en quantité appréciable, tandis que le taux des carbonates (7-8 %) reste faible. La composition chimique moyenne ne paraît pas subir de changements importants entre les mois de juillet et de novembre, comme l'atteste le même tableau I.

Malgré la constance relative de la composition chimique des eaux les taux de la salure sont variables suivant les puits (voir tableau I - résidu sec et NaCl). Ainsi au mois d'août 1955 la nappe était fortement salée au sud du lotissement (piézomètres 11 et 12). Au-delà, la zone salée suivait à peu près la piste centrale du lotissement vers le nord, en passant par le puits B, les piézomètres 16, 18 et le puits E. Dans le nord du lotissement on trouvait à cette époque de l'eau salée dans le piézomètre 23 (extrémité NE du lotissement) et dans la partie basse du lotissement, tout le long du drain qui sépare le périmètre de Mechra Bou-Derra de la rizière de la Compagnie Asiatique. La partie ouest du lotissement, correspondant au « dôme » de la nappe, ainsi que la ligne des piézomètres entre les lots 1 et 2 (piézomètres 22, 21, 27 et 20), étaient peu salées.

Au mois de novembre de la même année le taux de salure de la nappe s'était abaissé dans la partie sud du lotissement et avait augmenté dans la partie nord, où les piézomètres 22, 21, 27 et 20 accusaient une forte augmentation de la salure de la nappe.

CARACTERES DES SOLS

Composition des sols (tableau II)

Nous reproduisons au tableau II et par le graphique I (courbes de CS) la composition physico-chimique de quelques profils des sols du lotissement.

Ce sont des terres de texture fine, dans la plupart des cas limoneuses, légèrement calcaires. Le calcaire paraît être réparti assez uniformément dans la masse du sol. On peut considérer ces sols comme des sols jeunes steppiques, peu évolués par rapport à leur roche-mère. Font exception les profils B-226 et B-228 situés dans la partie est du lot 7 en bordure de la basse plaine du Rharb. Ces sols fortement argileux se rapprochent des tirs, aussi bien par leur aspect morphologique que par leurs propriétés physico-chimiques, comme nous le verrons plus loin. Dans le profil B-226 le calcaire présente quelques signes d'entraînement en profondeur. Les autres profils, de nature argilo-limoneuse calcaire, plus ou moins sableuse, sont moins bien différenciés du point de vue pédologique. Leurs différences de constitution sont surtout dues aux variations de la composition granulométrique, en relation avec l'hétérogénéité des dépôts.

La richesse de ces sols en matière organique, dont le taux dépasse pour l'ensemble des profils 1,0 %, paraît satisfaisante, d'autant plus que les horizons supérieurs contiennent souvent plus de 1,5 % d'humus et parfois même, surtout dans les sols argileux, plus de 2,0 %. Il faut remarquer toutefois que le taux de matière organique paraît diminuer considérablement dans les horizons sableux. La teneur en azote en est aussi assez élevée : rarement son taux descend au-dessous de 1,0 o/oo dans les horizons supérieurs.

Structure des sols (tableau III)

La porosité de ces sols est moyenne (colonne 4), autour de 46 % du volume total du sol ; mais la plus grande partie des pores sont capillaires fins : (colonnes 5 et 6). Ces pores fins représentent 70 % de la porosité totale. Cette répartition des pores conduit à une certaine compacité des sols, malgré leur nature argilo-limoneuse parfois fortement sableuse. On peut remarquer toutefois que les pores capillaires des sols limoneux sont relativement grossiers. En effet, le volume d'eau utilisable Pc (colonne 7) représente 80 % environ de la porosité fine. Par contre la compacité est plus grande dans les profils du type tirs, où la porosité fine est plus élevée, dépassant dans certains cas 90 % de la porosité totale, (colonnes 5 et 6) et où les pores capillaires sont plus fins. En effet, le

taux d'eau utilisable descend vers 70 % et même plus bas, comme dans le profil B-226 (colonne 7).

On remarque aussi que dans ces sols la porosité totale diminue avec la profondeur, tandis que dans les sols limoneux elle reste assez uniforme dans tout le profil avec des variations irrégulières en relation vraisemblable avec l'hétérogénéité des dépôts.

Ces sols sont peu agrégés (colonne 2) malgré leur richesse relative en matière organique, dont le taux moyen dépasse pour l'ensemble des profils 1 % (les horizons supérieurs contiennent souvent plus de 2 % d'humus). D'une manière générale les valeurs du diamètre moyen fictif des agrégats Gaf, qui ne dépassent pas 0,3 mm, varient autour de 0,19 mm, chiffre très faible. Le degré d'agrégation est peu élevé, même dans les sols du type tirs B-228 et B-226.

La macrostructure est grossière, à tendance fondue, surtout dans les horizons superficiels. Dans la plupart des profils les valeurs de l'indice NF (nombre de fentes par horizon : E/Gt) sont inférieures à 20 et, dans les horizons supérieurs, inférieures à 10 (colonne 9). Cette macrostructure fondue sur place s'effrite assez facilement au cours du tamisage. Le diamètre moyen des fractions tamisées Gt varie autour de 1,06 cm ; il augmente dans les couches argileuses et diminue dans les couches sableuses (colonne 10). Les mottes (supérieures à 0,2 cm) ne constituent en moyenne que 55 % de la masse totale du sol : le reste s'effrite assez facilement au cours du tamisage (colonne 11). Ces mottes sont relativement volumineuses, car leur grosseur moyenne se rapproche de 1,56 cm (colonne 12). La macrostructure est plus grossière et mieux agglomérée dans les sols du type tirs. Ainsi dans le profil B-228 on trouve respectivement Gt = 1,93 cm, A = 85 % et Gm = 2,29 cm.

D'une manière générale les mottes des terres limoneuses sont rigides (colonnes 13 et 14) : elles ne subissent pas de foisonnement au cours de l'humidification et de retrait au cours de la dessication, comme l'atteste le rapport entre les porosités mottières à l'état humide et à l'état sec : Pmh/Pms, lequel est inférieur à 1 ; en moyenne il oscille autour de 0,85. Par contre cette aptitude au foisonnement existe dans les profils des sols du type tirs, où ce rapport peut dépasser 1, surtout en profondeur.

La stabilité structurale dans l'eau est élevée, avec le rapport 100 LF/Pt dépassant largement 100. Les volumes d'eau nécessaires pour provoquer le déplacement spontané des particules dépassent largement la porosité totale, aussi bien dans les sols limoneux que dans les tirs. Toutefois dans les sols limoneux l'état structural est précaire avec le rapport

100 Lsp/Pt souvent inférieur à 100, surtout dans les horizons supérieurs ; il suffit d'exercer un petit effort pour provoquer le tassement du sol gorgé d'eau. Par contre dans les sols du type tirs, avec le rapport 100 Lsp/Pt dépassant 100, l'état structural est plus stable (colonne 17).

Complexe absorbant (tableaux II et IV, graphique III)

Si les propriétés physiques de ces sols ne paraissent pas tellement défavorables, sauf une certaine compacité et leur faible degré d'agrégation et d'agglomération en mottes, il en est autrement en ce qui concerne le complexe absorbant. Notons d'abord que les valeurs de la capacité d'échange des bases sont en relation étroite avec la composition granulométrique : elles deviennent relativement élevées dans les horizons riches en éléments fins et diminuent dans les horizons pauvres en ces éléments (sableux). Pour les sols limoneux, qui représentent la majorité des terres du lotissement, les valeurs de la capacité d'échange des bases oscillent autour de 20 méq. La capacité d'échange est plus élevée pour la même composition granulométrique dans les horizons supérieurs que dans les horizons profonds. Cette augmentation relative de la capacité d'échange des horizons supérieurs paraît être due à l'abondance de la matière organique dans ces horizons.

La dynamique du complexe absorbant est caractérisée par les traits suivants : le complexe absorbant des horizons supérieurs de ces sols est saturé par le calcium, mais à partir de 30-40 cm on voit apparaître le magnésium échangeable, dont le taux dans certains profils peut dépasser 50 % de la capacité totale d'échange des bases. De plus, les horizons profonds de ces sols limoneux s'enrichissent en sodium échangeable, lequel dans certains profils peut constituer un tiers des bases échangeables.

Nous sommes donc en présence ici de sols dont les horizons profonds sont nettement solontzeux avec des pH souvent supérieurs à 9. Ces profils solontzeux se trouvent surtout vers les limites ouest et nord du lotissement; ce sont les profils B-251, B-237, B-236, B-250, B-232 et B-234 (voir la carte I). Par contre le degré de solonetzation des sols couvrant les parties centrale et orientale de ce lotissement paraît être faible.

Malgré la présence du sodium échangeable l'aspect morphologique des profils ne traduit pas l'état solontzeux de ces sols. Cela est peut-être en relation avec leur salure élevée, qui empêcherait la dispersion des colloïdes.

Salure des sols (tableau V et graphique IV)

En général la valeur moyenne de la salure totale est égale à 87 méq. % dans les premiers 100 cm et à 114 méq. en profondeur.

Les horizons profonds sont donc plus salés que la surface. D'une manière générale cette allure de la répartition des sels dans les profils se maintient dans presque tous les sols étudiés. Dans quelques cas on constate l'accumulation des sels en surface ; c'est le cas du profil B-251 dans le lot 1, près du grand drain. L'allure générale de la répartition des sels dépend aussi de la composition granulométrique des terrains. Dans les sols plus ou moins homogènes le taux des sels augmente régulièrement avec la profondeur, ou bien il reste plus ou moins constant dans toute la masse du sol, avec toutefois une tendance à s'accumuler vers le bas. Par contre, dans les profils à roche-mère complexe la répartition des sels est très variable d'une couche à l'autre, avec des zones d'accumulation à certains niveaux. Enfin dans quelques profils il existe un véritable horizon d'accumulation des sels et la salure diminue aussi bien vers le haut que vers le bas.

Parmi les anions, ce sont les chlorures qui prédominent. L'augmentation de la salure du sol correspond généralement à l'augmentation du taux de l'ion Cl. Le taux des sulfates est faible, tandis que celui des bicarbonates est relativement plus élevé (voir graphique V). Il faut noter aussi l'apparition des carbonates alcalins, surtout en profondeur. Le cation prédominant est le sodium. Les cations alcalino-terreux apparaissent en haut des profils et diminuent rapidement avec la profondeur.

CONCLUSIONS

Ces caractères de la salure et du complexe absorbant posent des problèmes à résoudre.

La salure de la nappe est caractérisée par la prédominance du sodium et la pauvreté relative en magnésium. Or, l'adsorption du sodium est relativement modérée, si l'on en juge d'après son taux relativement faible par rapport au magnésium dans le complexe. Par contre le taux du magnésium échangeable dépasse souvent 40 % de la capacité d'échange des bases.

On peut supposer que les horizons profonds de ces sols contenaient initialement des doses élevées de magnésium échangeable et que, sous l'effet de la nappe salée, il se produit actuellement le remplacement partiel du magnésium et du calcium par le sodium, ou leur solonetzation. Mais la présence des sels solubles, qui semble empêcher la détérioration profonde des propriétés physiques de ces sols comme conséquence de leur solonetzation, ne s'oppose ni à la formation du carbonate de sodium, nocif pour les plantes, ni à l'élévation du pH.

Un autre problème à résoudre est celui de l'origine de la salure de ces sols. D'une manière générale les sols de ce type, sols jeunes sur alluvions récentes ou dess, ne sont pas salés. Or, les sols du périmètre de Mechra Bou Derra sont passablement salés et ce salage paraît être consécutif aux irrigations de la région de Sidi Slimane, qui auraient provoqué la remontée de la nappe et son refoulement vers l'aval, c'est-à-dire en direction du lotissement de Mechra Bou Derra, situé déjà dans la basse plaine du Rharb, dont la nappe phréatique est proche de la surface. Il est possible que la présence des rizières en aval du lotissement ait facilité la remontée de la nappe, sans en être la cause déterminante. En effet les cartes déjà anciennes de la nappe montrent une sorte d'avancée de celle-ci en direction de Mechra Bou Derra.

Le salage des sols à partir de la nappe semble être facilité par la nature de ces sols limoneux, modérement compacts, à la porosité capillaire fine bien développée, conditions favorables à la remontée capillaire des sels. Ces sols irrigués restent constamment humides au cours de l'été, les solutions salines peuvent alors se déplacer vers le haut sous l'effet de l'évaporation qui règne dans ces régions pendant ladite saison. En effet, l'évaporation intense due à la chaleur et à la siccité atmosphérique provoque, du fait de la proximité de la nappe, l'ascension de l'eau par capillarité et accessoirement celle des sels qui s'y trouvent dissous. Toutefois, la remontée des sels dans les tirs paraît être moins aisée, si l'on en juge d'après quelques observations que nous avons pu faire au cours de nos prospections. Car à cause de la plus grande compacité de ces sols les mouvements capillaires ascensionnels de l'eau sont gênés par l'étroitesse des pores.

Il est à noter que les irrigations paraissent maintenir au cours de l'été le degré de salure des horizons supérieurs à un niveau acceptable par les plantes en lavant partiellement ces sols.

L'état du complexe et la répartition des sels dans les profils expliquent les accidents de la végétation observés à Mechra Bou Derra : les propriétés physico-chimiques des horizons profonds sont défavorables à la croissance normale des plantes cultivées, tandis qu'en surface les sols paraissent plus sains. Dans ces conditions les plantes aux racines profondes peuvent se développer les premières années, avant que leurs racines n'atteignent les horizons défavorables à leur existence. C'est pour cette raison que les arbres, qui végétaient d'abord normalement dans ces terres, commencent à montrer des signes de dépérissement au bout de quelques années, quand leurs racines ont atteint les horizons profonds fortement salés et solontzeux.

Malheureusement, les études ayant dû être arrêtées pour des causes indépendantes de notre volonté, il nous manque les renseignements complémentaires qui nous auraient permis de résoudre ce problème.

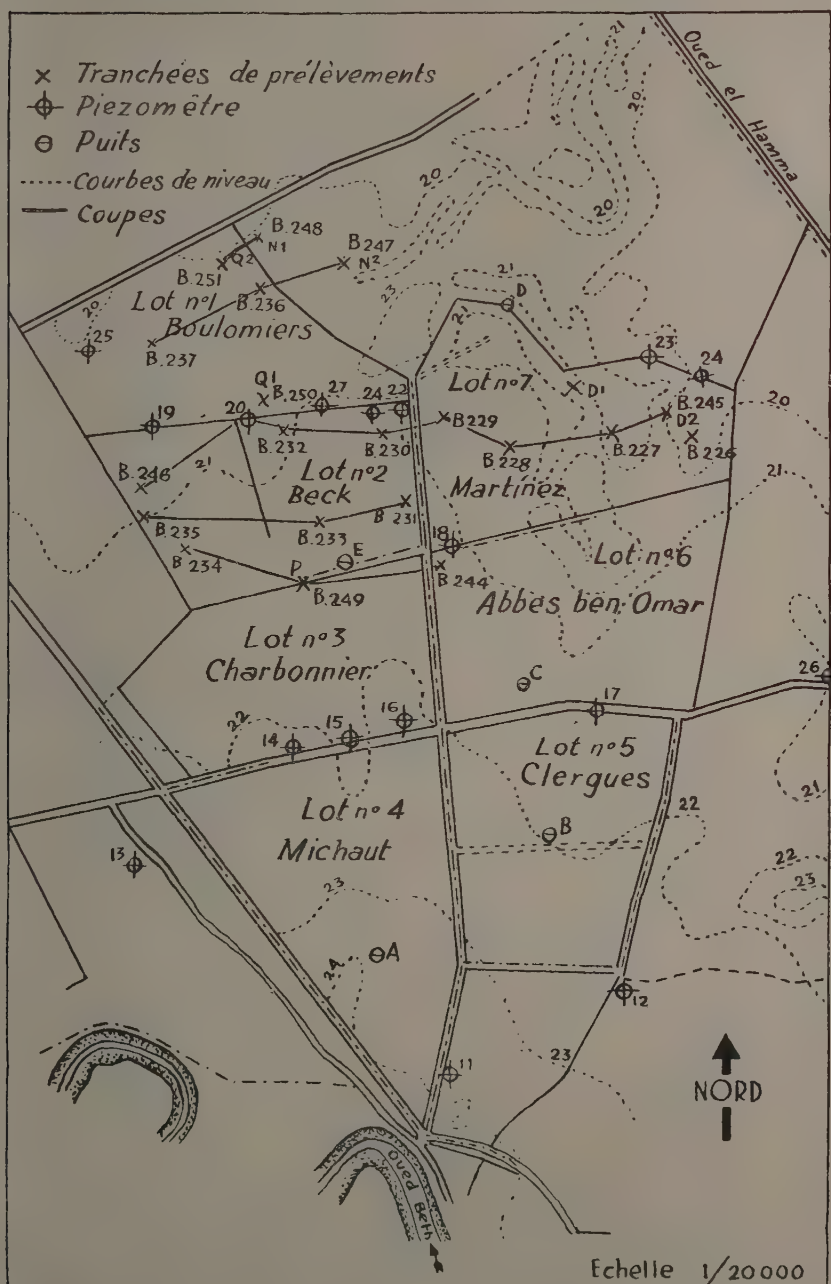
L'amélioration de ces terres s'avère difficile, car les horizons défavorables à la croissance des plantes se trouvent en profondeur, au-dessous de 50 cm en général. Des irrigations massives pourraient abaisser le taux des sels, à condition toutefois que le drainage soit assuré. Mais le déplacement du sodium et éventuellement du magnésium du complexe nécessiterait l'apport d'amendement calcique, en l'occurrence de plâtre. Or, le calcium de plâtre demande un certain temps pour atteindre les horizons profonds. En outre la concentration du calcium dans l'eau d'irrigation devra être assez élevée pour qu'il puisse agir efficacement et déplacer le sodium et le magnésium du complexe absorbant de ces horizons, d'où éventuellement une platrage massif. Mais les produits d'échange devront être éliminés du sol ; ce qui pose le problème du drainage de cette plaine.

Dans l'état actuel les cultures à système radiculaire profond paraissent être contre-indiquées dans ce périmètre. Il faut les remplacer par des cultures aux racines superficielles, telles que les graminées et entreprendre en même temps l'amélioration profonde de ces sols.

G. BRYSSINE

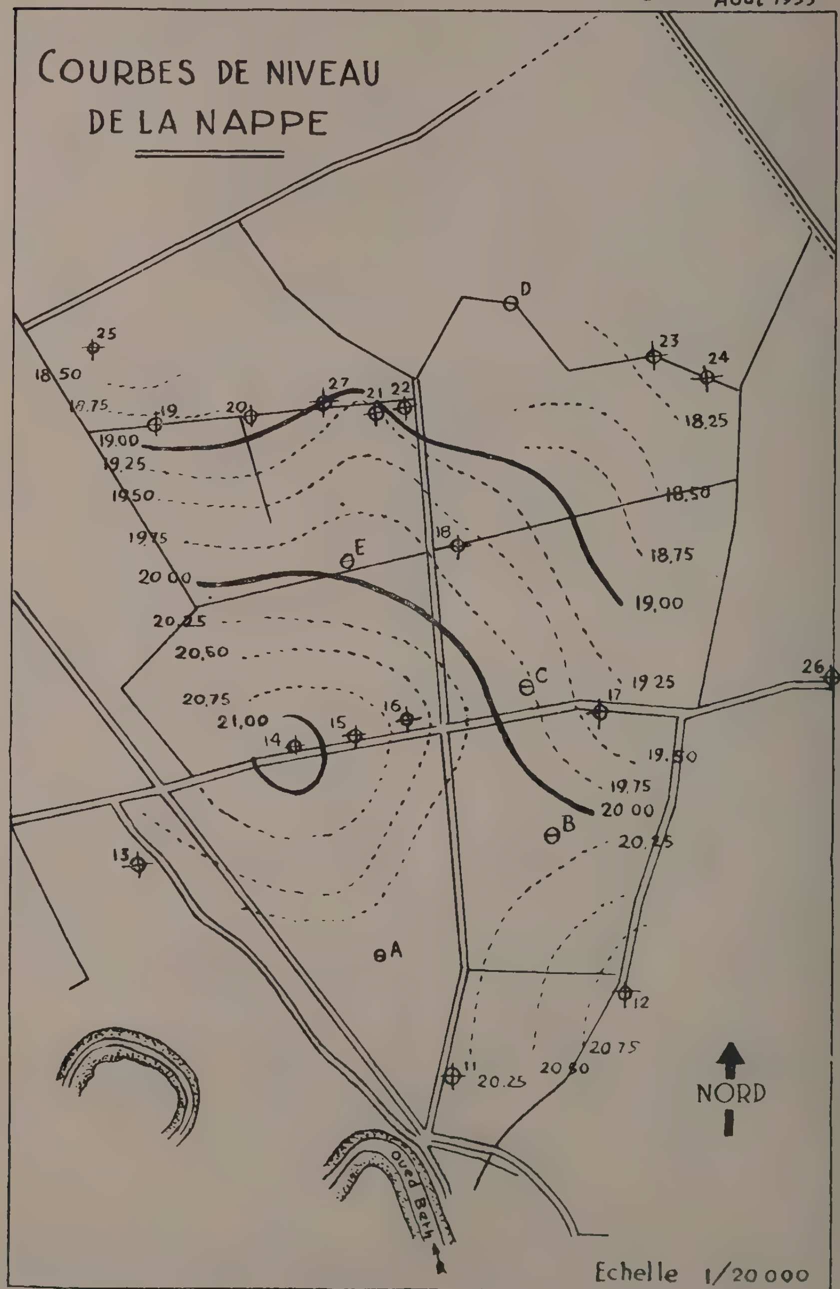
1957

LOTISSEMENT DE MECHRA BOU DERRA



CARTE I

LOTISSEMENT DE MECHRA BOU DERRA
CARTE DE LA NAPPE Août 1955

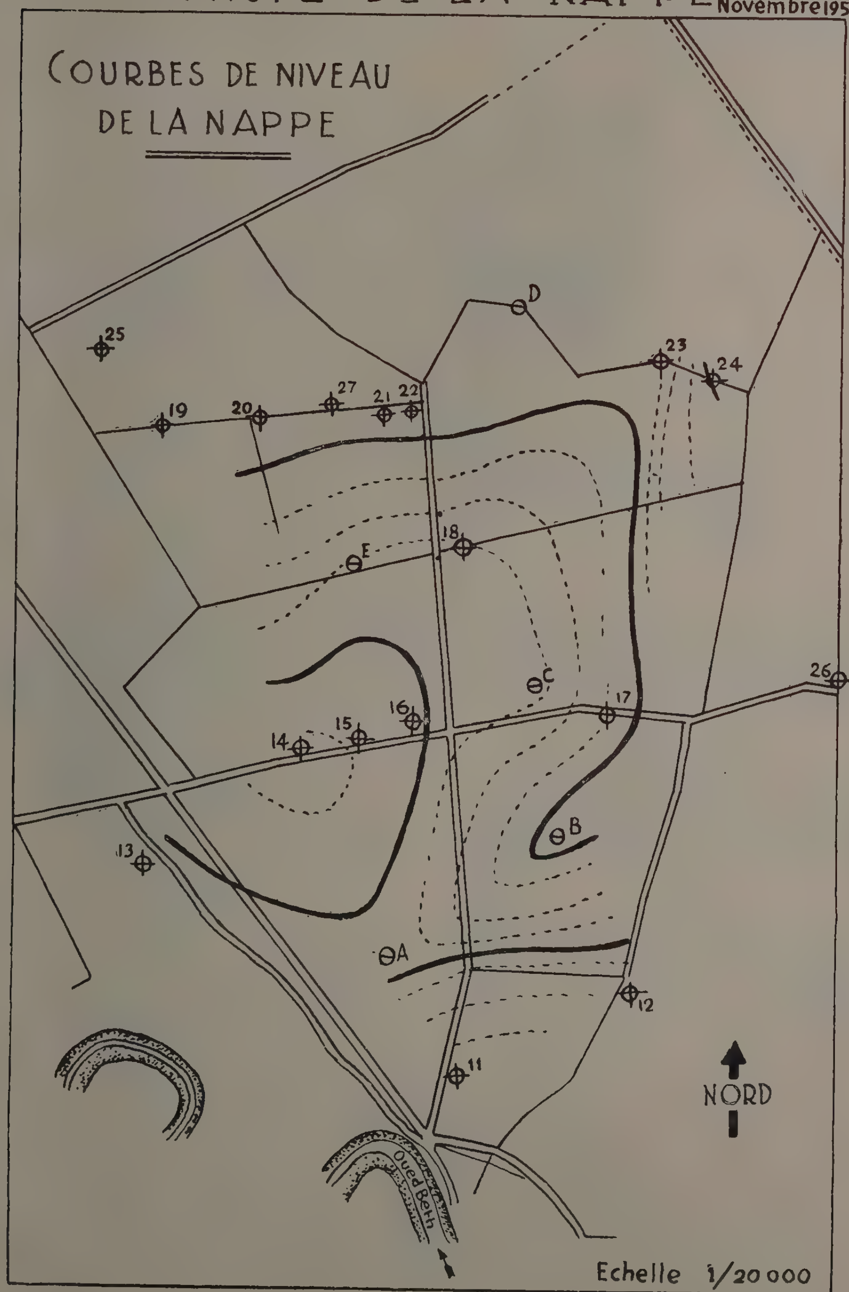


CARTE II

LOTISSEMENT DE MECHRA BOU DERRA

CARTE DE LA NAPPE

Novembre 1955

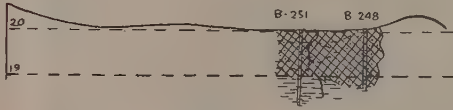


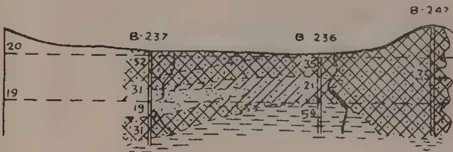
CARTE III

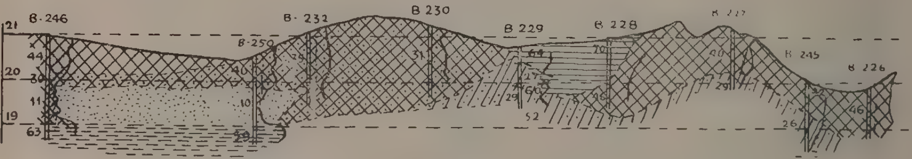
GRAPHIQUE I

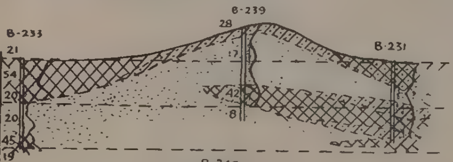
COUPES GEOLOGIQUES

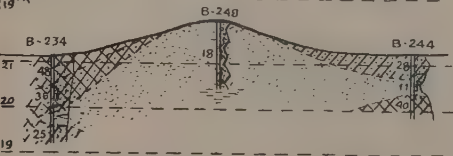
Echelles x = 1/20000
y = 1/400











LÉGENDE

- Terrain fortement argileux
- Terrain argileux
- Terrain limoneux
- Terrain sablo-limoneux
- Terrain limono-sableux
- Terrain sableux

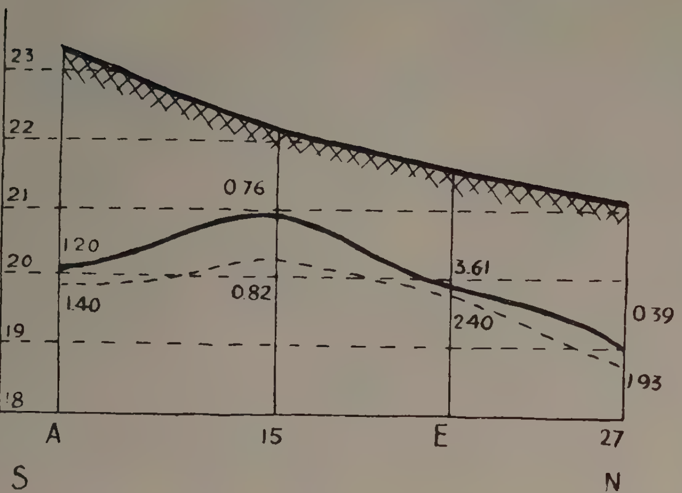
GRAPHIQUE II

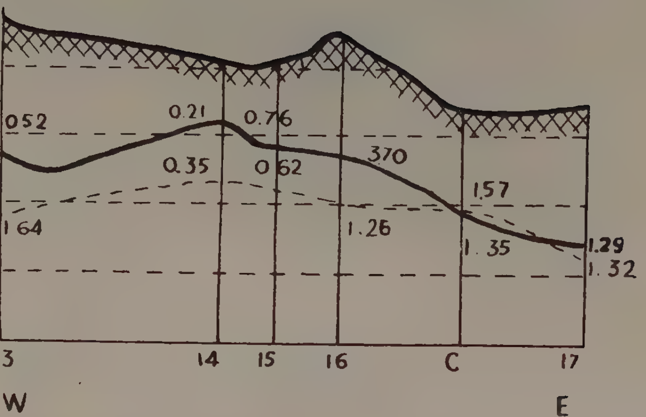
COUPES SN ET WE. de la nappe phréatique du lotissement

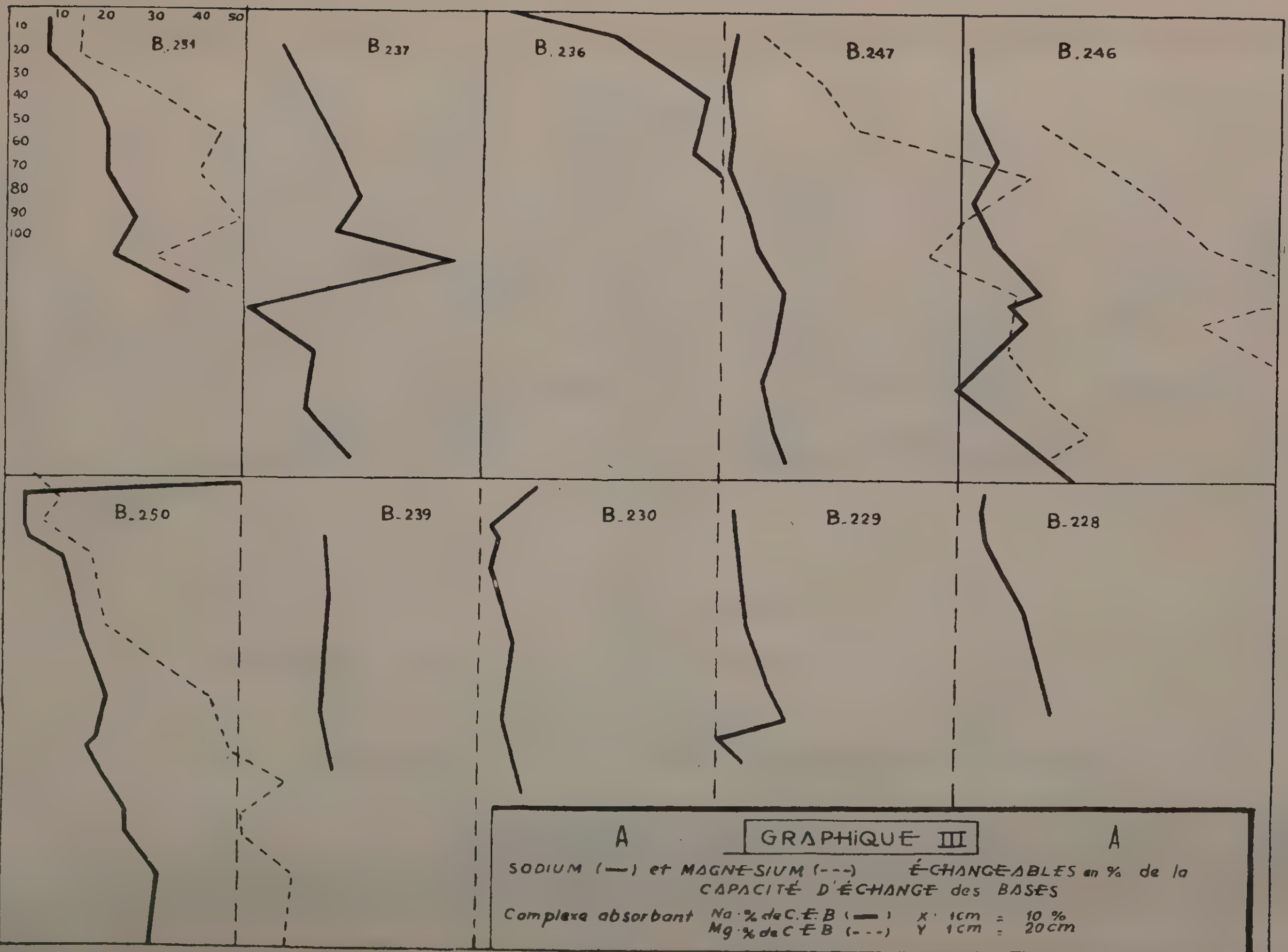
MECHRA BOU DERRA

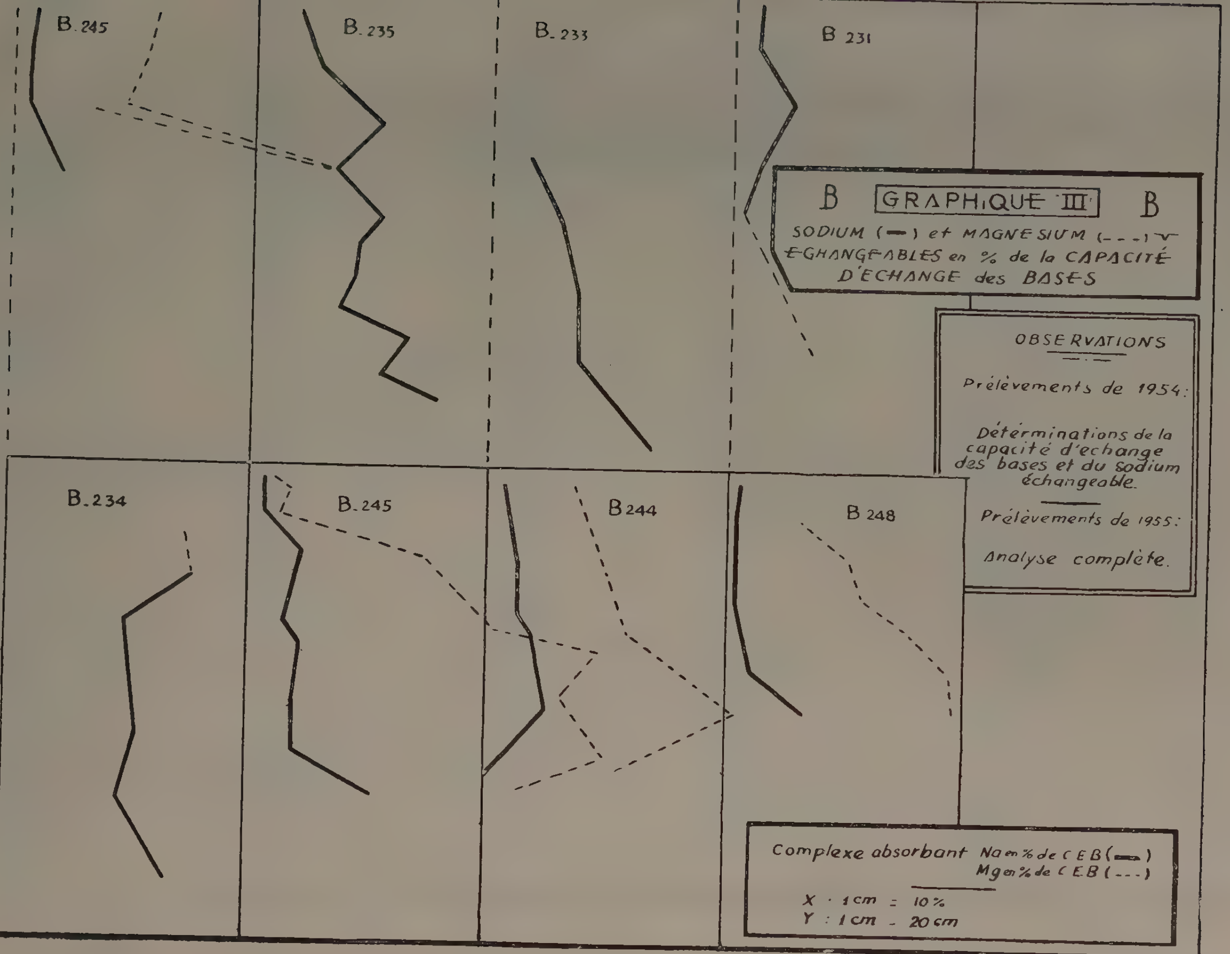
Niveau de la nappe au mois de juillet 1955 ———

" " " " " " " novembre " – – –

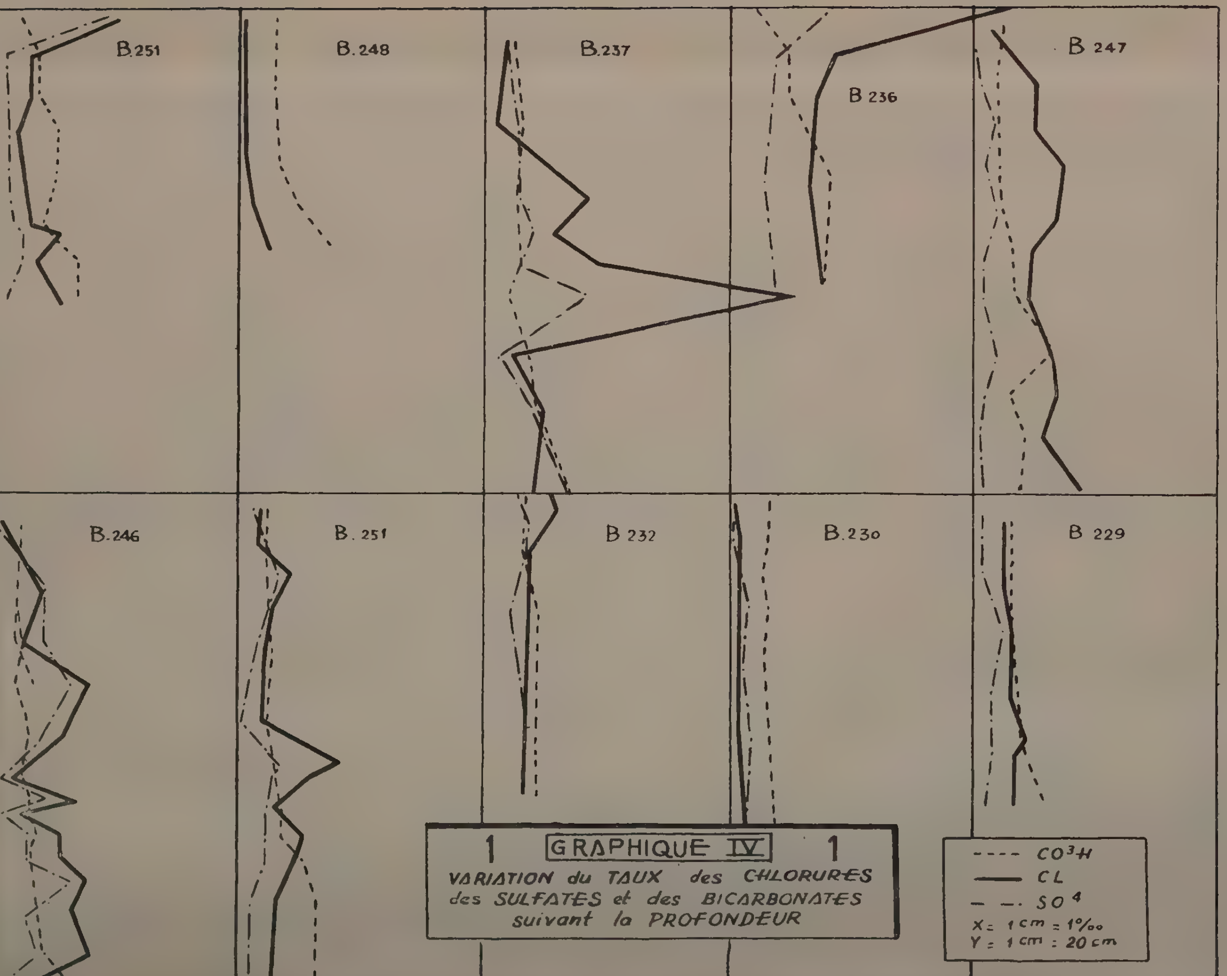





10 20 30 40 50
10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
B.231
B 237
B.236
B.247
B.246
B.250
B.239
B.230
B.229
B.228
A GRAPHIQUE III A
SODIUM (—) et MAGNESIUM (---) ÉCHANGEABLES en % de la CAPACITÉ D'ÉCHANGE des BASES
Complexe absorbant Na % de C.E.B (—) X 1cm = 10 %
Mg % de C.E.B (---) Y 1cm = 20cm



B GRAPHIQUE III B
SODIUM (—) et MAGNESIUM (- - -)
ECHANGEABLES en % de la CAPACITÉ D'ECHANGE des BASES
OBSERVATIONS
Prélèvements de 1954 :
Détérminations de la capacité d'echange des bases et du sodium échangeable.
Prélèvements de 1955 :
Analyse complète.
B.245
B.235
B.233
B 231
B.234
B.245
B 244
B 248
Complexe absorbant Na en % de CEB (—)
Mg en % de CEB (- - -)
X : 1 cm = 10 %
Y : 1 cm = 20 cm



1 GRAPHIQUE IV 1

VARIATION du TAUX des CHLORURES des SULFATES et des BICARBONATES suivant la PROFONDEUR

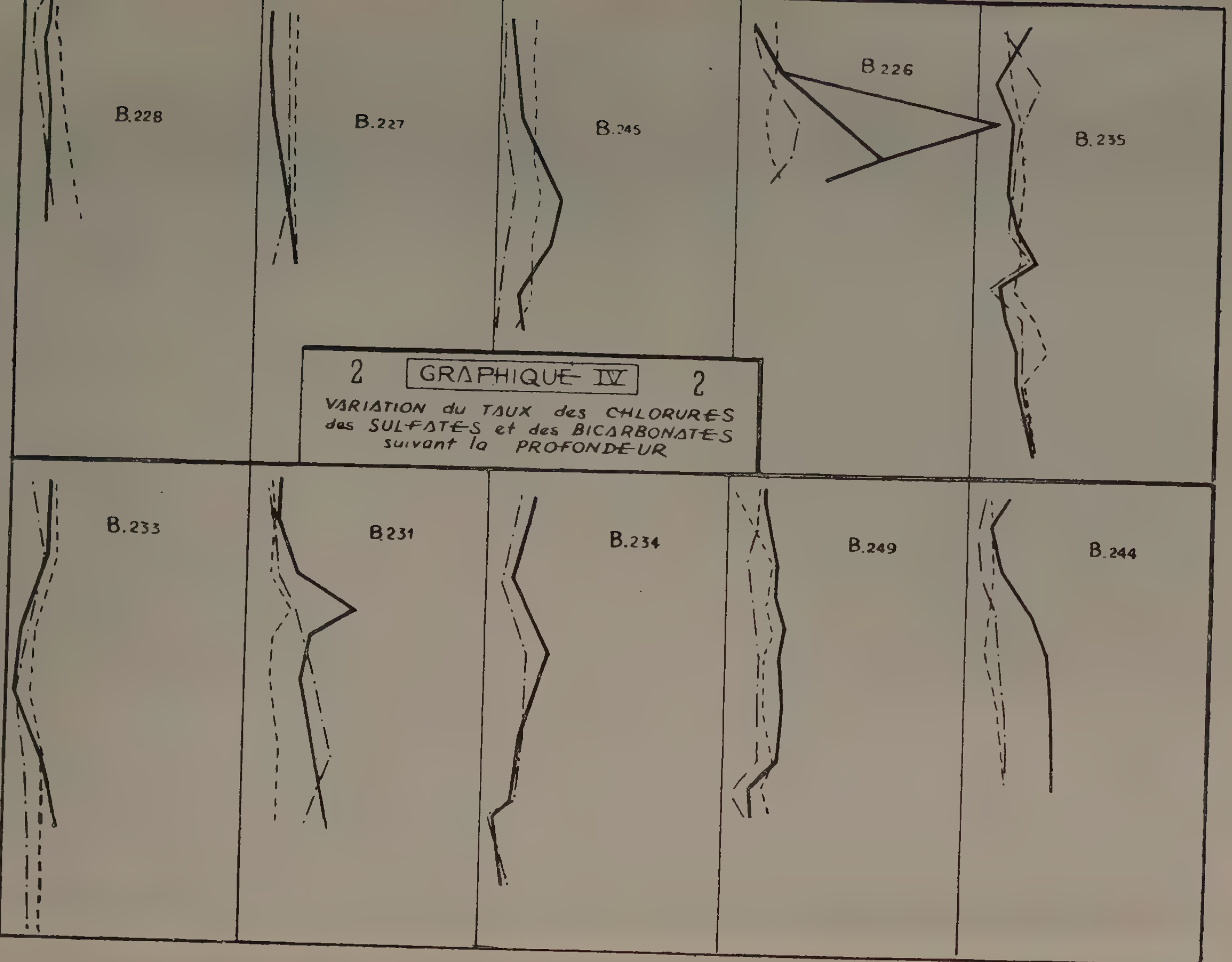

B.228
B.227
B.245
B.226
B.235
2
GRAPHIQUE IV
2
VARIATION du TAUX des CHLORURES
des SULFATES et des BICARBONATES
suivant la PROFONDEUR
B.233
B.231
B.234
B.249
B.244

TABLEAU I

Salure de la nappe

N°	PRO-FON-DEUR	CONC. Es g/l	CO^3H / NaCl	ANIONS Cl % An.	CO^3 % An.	CO^3H % An.	SO^4 % An.	CATIONS Ca % Cat	Mg % Cat	Na % Cat	K % Cat
Fin juillet 1955											
20	1.84	2.00	0.67	45	13	34	8	11.5	25	63	0.5
27	2.09	1.20	0.39	46	10.5	38.5	5	10	16	74	0
21	1.68	2.40	1.05	50	10	12	28	7	14	78.5	0.5
22	1.60	2.75	1.01	46	9	20	25	3	8	89	T
D	1.55	5.90	4.45	89	1	5	4	5.5	11	82.5	I
23	2.17	7.55	6.58	89	0	0.5	10.5	10	16	74	0
P	1.60	3.15	1.29	50	5	26	19	2.5	6	91	0.5
E	1.61	5.95	3.61	62	6	9	19	3	12	85	T
18	1.42	4.25	2.34	61.5	3	9.5	26	3	12	85	T
13	1.90	1.20	0.52	49	14	20	17	19	16	65	0
14	0.78	0.70	0.21	34.5	17	28.5	20	8.5	17	74.5	0
15	1.23	1.45	0.76	60	12	18	10	8	20	72	0
16	1.80	4.60	3.70	81	1	1	7	1	1	98	0
C	1.52	2.20	1.57	69	9	12	10	7	24	69	0
17	2.04	1.50	1.27	71	14	15	T	11	17	72	0
A	3.10	2.65	1.20	53	17	22	8	3.5	15	81.5	0
8 B	1.90	12.85	11.30	62	6	9	19	3	12	85	T
11	3.40	5.20	4.08	77	6	3	13	7	22	70	0
12	1.78	6.60	3.87	86	T	6	8	5	1	94	0
MOYENNES	1.84	3.89	2.62	64	8	14	14	7	16	77	T
Novembre 1955											
20	1.30	3.00	1.40	49.5	11.5	4.5	34	6	19	75	0
27	2.33	3.40	1.93	78	10	10	2	2	16	82	0
21	2.38	5.20	3.38	65	4	5	26	3	20	77	0
22	3.17	3.80	2.06	60	10	8	22	2	12	86	0
D	n.d.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
23	1.58	7.40	7.18	94	0	5	1	11	18	71	T
P	n.d.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
E	1.77	4.10	2.40	61	8	10	21	5	13	80	0
18	1.30	4.60	2.87	63	4	4	29	4.5	17	78.5	0
13	2.77	2.95	1.64	58	7	10	25	5	19	76	0
14	1.62	0.70	0.35	54	9	28	9	9	18	73	0
15	1.84	2.10	0.82	53	7	13	27	6.5	18.5	75	0
16	2.45	3.5	2.28	68	2	5	25	0.5	0	99.5	T
C	1.44	2.05	1.35	62	10	12	16	2	12	86	0
17	2.15	2.10	1.52	73	7	11	10	8	11	81	0
A	3.30	2.80	1.40	54.5	15.5	17	13	4	16	80	0
B	3.26	10.30	8.30	74	2	1	23	9	36	55	T
11	3.38	4.10	3.04	73	4	4	19	10	28.5	61.5	T
12	2.25	4.50	2.74	67	8	22	3	11	18	71	T
MOYENNES	2.95	3.91	2.62	65	7	10	18	5.5	17	77.5	T

OBSERVATIONS — Les points de prélèvement (puits et pièzomètres) sont disposés dans ce tableau suivant les coupes ouest-est, en allant du nord (haut du tableau) au sud (bas du tableau) ; les puits sont marqués par les lettres, les pièzomètres par les chiffres (voir les cartes II et III de la nappe).

TABLEAU II a

Composition Physique

N°	PROFONDEUR	CS	CAILLOUX %	COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE %					HUMUS %	N %	CEB méq.
				ARGILE	LIMON	SABLE FIN	SABLE GROSSIER	CALCAIRE			
B-228 (lot 7)	0-10	69	0	60	26	2	tr	9	2.4	2.2	21
	10-20	78	»	68	21	2	»	10	1.8	1.9	21
	20-30	79	»	63	26	2	0	11	1.6	1.7	21
	30-80	66	»	57	25	10	1	10	1.4	1.6	23
	80-120	46	»	40	33	22	3	8	1.2	1.4	17
	120 +	47	»	41	30	29	tr	5	1.3	1.3	—
B-226 (lot 7)	0-10	48	0	42	43	10	1	4	1.8	1.7	27
	10-40	45	»	40	44	12	1	2	2.2	2.	28
	40-60	49	»	40	39	11	1	10	1.6	1.5	26
	60-70	48	»	39	33	14	1	12	1.1	1.2	21
	70-80	46	»	37	32	17	2	12	1.0	1.2	20
	80-100	43	»	32	21	31	3	20	0.7	1.0	—
B-244 (lot 7)	0-15	28	0	23	21	42	1	10	1.2	1.3	19
	15-25	37	»	32	27	33	1	5	2.1	1.9	23
	25-55	26	»	21	21	46	1	9	0.9	1.0	15
	55-60	23	»	17	23	45	2	13	1.0	0.8	14
	60-85	11	»	8	8	65	5	11	0.6	0.5	9
	85-112	35	»	28	32	26	1	10	0.7	0.7	18
	112-140	44	»	36	37	13	1	10	0.5	0.8	21
B-230 (lot 2)	0-10	35	0	27	27	43	tr	4	1.7	1.6	17
	10-30	32	»	27	31	39	»	4	1.9	1.8	17
	30-40	26	»	20	26	44	»	10	0.7	1.1	14
	40-55	31	»	26	30	38	»	6	1.8	1.7	17
	55-85	29	»	22	32	34	»	12	0.7	1.1	12
	85-120	27	»	20	37	32	»	11	0.6	1.2	15
	120-150	39	»	30	46	14	»	10	0.7	0.9	12

OBSERVATIONS : *CS* — coefficient de surface permettant de représenter la composition granulométrique du sol par une seule valeur :

$$CS = \frac{1000 \text{ argile} + 100 \text{ limon} + 10 \text{ sable fin} + 1 \text{ sable grossier}}{1000}$$

Pour les sols argileux CS est supérieur à 50, pour les sols limoneux CS varie entre 30 et 50 et pour les sols sableux il est inférieur à 20.

CEB = capacité d'échange des bases.

TABLEAU II b

Composition physique

N°	PROFONDEUR	CS	CAILLOUX %	COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE %					HUMUS %	N o/oo	CEB méq
				ARGILE	LIMON	SABLE FIN	SABLE GROSSIER	CALCAIRE			
B-248 (lot 1)	0-13	38	0	33	38	21	1	3	2.9	1.9	22
	13-26	41	»	36	34	23	1	3	1.9	1.7	22
	26-46	37	»	32	30	29	1	5	1.5	1.4	20
	46-61	39	»	31	28	28	1	13	1.2	1.5	17
	61-72	40	»	31	25	24	0	17	1.0	1.1	15
	72-95	35	»	25	30	24	0	19	0.7	0.9	12
	95	33	»	23	34	29	1	16	0.5	0.8	12
	eau à 125 cm										
B-235 (lot 2)	0-20	50	0	41	35	11	1	11	1.0	1.5	14
	20-45	47	»	37	34	10	1	13	1.0	1.0	13
	45-65	34	»	28	27	30	2	12	0.7	1.1	12
	65-90	82	»	71	12	8	1	12	0.1	0.9	15
	90-100	14	»	11	9	49	18	10	0.3	0.8	15
	100-115	22	»	17	22	16	32	13	0.1	0.7	15
	115-125	9	»	7	4	40	39	10	0	—	8
	125-140	20	»	16	21	30	21	10	0.1	0.7	16
	140-150	31	»	25	34	25	5	9	0.5	0.9	12
	150-170	20	»	16	14	56	tr	10	0.3	0.8	14
	170 +	45	»	37	45	6	tr	8	0.5	1.0	14
B.231 (lot 2)	0-10	38	0	30	43	17	tr	10	1.1	1.5	14
	10-35	36	»	30	39	26	2	4	2.1	1.7	18
	35-55	34	»	26	41	22	tr	11	0.9	1.0	11
	55-65	35	»	27	39	25	tr	10	0.9	1.1	13
	65-80	12	»	9	7	69	7	10	0.4	0.7	8
	80-100	26	»	19	41	30	1	9	0.4	1.0	17
	100-140	42	»	34	44	9	tr	8	0.7	1.1	—
	140-160	23	»	18	23	47	0	10	0.6	0.9	10
	160-180	47	»	38	48	5	0	8	1.0	1.3	—
	0-20	28	0	23	23	38	tr	9	1.0	1.3	7
	20-60	9	»	7	2	42	37	12	0.5	0.9	—
	60-85	19	»	15	15	50	5	12	0.4	0.9	—
	85-110	7	»	6	3	34	50	9	0.2	0.6	—
	110-140	18	»	14	20	55	2	8	0.4	0.9	—
	140-170	42	»	34	34	21	5	9	0.4	1.2	—
	170-210	8	»	6	8	47	31	11	0.1	0.6	—
B-233	0-20	28	0	23	23	38	tr	9	1.0	1.3	7
	20-60	9	»	7	2	42	37	12	0.5	0.9	—
	60-85	19	»	15	15	50	5	12	0.4	0.9	—
	85-110	7	»	6	3	34	50	9	0.2	0.6	—
	110-140	18	»	14	20	55	2	8	0.4	0.9	—
	140-170	42	»	34	34	21	5	9	0.4	1.2	—
	170-210	8	»	6	8	47	31	11	0.1	0.6	—

TABLEAU III a

Structure *

N°	HORIZONS	Gaf (en mm)	POROSITÉ						MACROSTRUCTURE									SS	CS
			Pt	Pf % Pt		Pc (en % Pf)	LA (en % Pt)	NF E = Gt	Gt	Am	Gm (en cm)	P (en % de Pt)	Pmh / Pms	L % Pms			Lsp (en % de Pt)	
				Pg	Pf				cm	%				Lip	LA	Lsp		
1	2	3	4	5	9	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
B-235	0-20	0.45	49	20	80	78	83	22	0.89	70	1.23	91	8.96	57	80	113	94	50
	20-45	0.27	49	29	71	75	92	42	0.59	66	0.86	98	0.73	48	67	105	102	47
	45-65	0.19	49	38	62	77	93	29	0.69	56	1.17	100	0.62	46	58	90	90	54
	65-90	0.12	47	48	52	81	105	47	0.53	51	0.90	102	0.51	40	53	72	74	82
	100-115	0.17	45	38	62	87	93	45	0.33	35	0.84	99	0.64	49	60	81	78	22
B-231	0-10	0.17	44	17	83	79	95	9	1.11	55	1.97	104	0.73	51	69	99	112	38
	35-55	0.16	46	33	67	79	105	43	0.47	59	0.74	118	0.52	35	53	81	105	34
	65-80	0.12	46	69	31	—	—	500	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	12
	80-100	0.11	45	19	81	79	96	19	1.03	50	1.02	109	0.68	45	61	87	101	26
	100-140	0.11	48	27	73	70	96	34	1.19	72	1.64	103	0.70	53	66	107	113	42
B-228	0-10	0.20	49	11	89	72	89	4	2.79	86	3.42	83	1.25	75	111	171	—	69
	20-30	0.25	45	—	103	71	98	8	1.19	82	1.41	101	1.01	67	99	146	148	79
	30-80	0.17	46	4	96	73	99	29	1.73	84	2.07	88	1.21	73	120	169	134	66
	80-120	0.12	42	—	105	73	78	15	2 61	90	2.94	63	2.10	122	167	270	135	46

* Seuls les prélèvements de 1954 ont été analysés.

TABLEAU III b

Structure

N°	HORIZONS	Gaf (en mm)	POROSITÉ Pt	Pf % Pt Pg	Pf	Pc (en % Pf)	LA (en % Pt)	MACROSTRUCTURE NF = E/Gt	Gt cm	Am %	Gm (en cm)	P (en % de Pt)	Pmh/Pms	L % Pms Lip	LA	Lsp	SS Lsp (en % de Pt)	CS
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
B-226	0-10	0.21	47	24	76	63	100	7	1.43	78	1.81	104	0.63	39	65	90	109	48
	40-60	0.24	48	22	78	64	86	14	1.42	86	1.65	59	0.96	59	84	130	108	49
	60-70	0.16	48	20	80	68	92	9	1.12	86	1.29	68	1.16	71	103	144	100	48
	70-100	0.13	44	13	87	57	103	8	2.48	89	2.78	71	1.18	71	92	140	103	43
B-230	0-10	0.19	47	39	61	79	107	12	0.84	63	1.28	98	0.63	51	76	128	87	35
	30-40	0.14	45	16	84	86	86	40	0.24	36	0.54	—	—	—	—	—	100	26
	55-85	0.16	45	30	70	83	95	90	0.33	69	0.42	—	—	—	—	—	94	29
	85-120	0.19	42	17	83	84	97	43	0.82	73	1.09	108	0.72	47	71	89	114	27
	120-150	0.10	46	15	85	82	94	40	0.75	59	1.23	106	0.76	56	72	111	125	39

	0-20	0.13	45	32	68	80	89	30	0.66	52	1.20	89	0.88	65	78	111	86	28
	20-60	0.12	47	54	46	79	123	174	0.23	24	0.78	—	—	—	—	—	74	9
B-233	60-85	0.12	43	38	62	84	103	178	0.14	10	0.53	—	—	—	—	—	84	19
	85-110	0.12	44	70	30	80	—	500	0.05	0	—	—	—	—	—	—	—	7
	110-140	0.10	47	57	43	77	139	231	0.13	18	0.49	—	—	—	—	—	80	18
	170-210	0.12	49	73	27	78	—	800	0.05	0	—	—	—	—	—	—	—	8

Colonne 3 — Gaf : grosseur moyenne des agrégats « fictifs » obtenus au cours du tamisage humide ;

» 4 — Pt : porosité totale en % du volume total du sol ;

» 5 et 6 — porosité grossière Pg et porosité capillaire fine Pf en % de la porosité totale ;

» 7 — Pc : volume des pores capillaires en % de la porosité fine Pf ;

» 8 — limite d'adhésivité LA en % de la porosité totale Pt ;

» 9 — NF : nombre de fentes par horizon ; E : épaisseur de l'horizon ; Gt : grosseur moyenne des fractions de tamisage sec ;

» 10 — Gt : grosseur moyenne des fractions de tamisage sec ;

» 11 — Am : pourcentage des mottes supérieures à 2,0 mm ;

Colonne 12 — Gm : grosseur moyenne des mottes ;

» 13 — porosité des mottes Pm en % la porosité totale Pt ;

» 14 — rapport entre le volume des pores à l'état humide Pmh et à l'état sec Pms ;

» 15, 16 et 17 — valeurs des limites d'Atterberg (limite inférieure de plasticité Lip, limite d'adhésitivité LA et limite supérieure de plasticité Lsp) en % des valeurs de la porosité des pores des mottes sèches ;

» 18 — valeurs de la limite supérieure de plasticité Lsp en % de la porosité totale Pt ; SS — stabilité structurale ;

» 19 — coefficient de surface (voir tableau II).

TABLEAU IV a

Complexe absorbant

N°	CS	CEB	CATIONS ÉCHANGEABLES (% de CEB)				pH
			Ca	Mg	Na	K	
B-251							
0-10	42	22	73	15.5	8.5	2	nd
10-30	44	22	74	15	8.5	1.5	»
30-45	30	17	48.5	31	17	1.5	»
45-60	21	11	33	43.5	21	1.5	»
60-85	26	13	37	40	20.5	1.5	»
86-93	13	11	21	49	26.5	1.5	»
93-95	37	18	22.5	48.5	26.5	1.5	»
95-115	47	25	20.5	30.5	22	1	»
115-130	51	26	11.5	48.5	38	1	»
B-248							
0-13	38	22	75	20.5	2.5	2	»
13-26	41	22	81.5	15	2	1.5	»
26-46	37	20	72	25	2	1	»
46-61	39	17	68	28.5	2	1	»
61-72	40	15	57.5	37.5	3.5	1.5	»
72-95	35	12	48	45.6	5	1	»
95 +	33	12	36	46.5	16	1.5	»
1	2	3	4	5	6	7	8

TABLEAU IV b

Complexe absorbant

N°	CS	CEB	CATIONS ÉCHANGEABLES (% de CEB)				pH
			Ca	Mg	Na	K	
B-247							
0-20	27	10	77	8.5	3	11	8.15
20-45	36	15	73	21	1.5	4.5	8.3
45-55	22	9	61.5	28	3.5	4	8.85
55-80	22	9	27	65	2.5	2.5	9.0
80-95	30	12	40	52.5	6	1.5	9.25
95-110	—	17	46	44.5	8	1.5	9.55
110-130	42	17	23.5	61.5	13.5	1.5	9.65
130-155	38	17	27	60.5	11.5	1	9.3
155-167	25	12	21.5	67.5	9.5	1.5	9.55
167-190	24	9	8	78	11.5	1.5	9.35
190-215	44	16	24.5	60	13.5	1.5	9.15
215 +	38	13	19.5	67.5	11.5	1.5	9.5
1	2	3	4	5	6	7	8

TABLEAU IV c — Complexe absorbant

N°	CS	CEB	CATIONS ÉCHANGEABLES (% de CEB)				pH
			Ca	Mg	Na	K	
B-246							
0-30	46	25	82.5	14.5	1.5	1.5	8.75
30-55	41	24	82.5	13.5	2.5	1.5	8.7
55-70	46	21	62.5	28	7.5	2	8.1
70-90	30	13	49.5	40.5	3	1	8.3
90-112	14	10	34.5	51.5	13	1	8.4
112-125	4	4	3	79	17	1	8.8
125-130	14	10	26	62	11	1	9.3
130-145	8	6	34.5	51	14.5	0	9.0
153-166	30	10	23	76	0	1	9.25
210	65	18	13	61.5	24.5	1	9.35
225	67	20	1	79	19	1	9.35
B-250							
0-15		18.5	82.5	12	4	1.5	n.d.
15-30		17.5	86.5	8	4	1.5	»
30-40		16	80	13.5	5	1.5	»
40-55		10.5	67	19	12.5	1.5	»
55-80		9.5	61.5	21.5	16	1	»
80-110		4.5	28	44.5	22	1	»
110-115		13.5	31	48	20	1	»
115-120		11.5	31.5	48.5	18	1	»
120-140		9.5	16	59.5	21.5	1	»
140-145		11	20.5	51	26	1	»
145-160		21	20	51.5	26.5	1	»
160-180		29	4	61.5	33.5	1	»
200		25	6.5	60	32.5	1	»
		20	6.5	18.5	73	2	»
B-245							
0-20	—	24	63.5	30	5	1.5	8.9
20-40	45	31	67.5	27	4	1.5	8.5
40-60	45	34	72.0	23.5	3.5	1	8.65
60-75	40	19	14	68	10	1.5	8.7
145 +	—	8	39	55	4.5	1.5	9.2
1	2	3	4	5	6	7	8

TABLEAU IV d

Complexe absorbant

N°	CS	CEB	CATIONS ÉCHANGEABLES (% de CEB)				pH
			Ca	Mg	Na	K	
B-249							
0-8	24	11	78.5	5.5	4	12	n.d.
8-15	19	11	76.5	9	3.5	11	»
15-30	22	12	81.5	7	4	7.5	»
30-45	23	14	46.5	36	11	6.5	»
58-70	14	9	32.5	52	8	7	»
70-85	16	8	9	73	11	7	»
85-110	12	9	17.5	65.5	10	7	»
110-130	21	10	8	75	10	7	»
130-135	18	6	14	56	24	5.5	»
B-244							
0-15	28	19	77	18	3.5	1.5	8.3
25-55	26	15	67	25	6.5	1.5	8.35
55-60	23	14	64.5	28	6.5	1	8.4
60-85	11	9	60	30	9	1	8.4
85-112	35	18	35	51.5	12.5	1	8.9
112-140	44	21	71	28	0	1	8.95
1	2	3	4	5	6	7	8

TABLEAU V a

Salure du sol

N°	CS	Conc. méq g/l	ANIONS						CATIONS			
			Cl % An.	CO^3 % An.	CO^3H % An.	SO^4 % An.	SO^4/Cl	CO^3H/Cl	Ca % Cat.	Mg % Cat.	Na % Cat.	K % Cat.
B-251												
0-10	42	158	55	0	7	36	0.66	0.13	37	9	54	
10-30	44	78	49 +	»	35	14	0.28	0.72	13	1	87	
30-45	30	80	52 +	2	34	12	0.24	0.65	6	1	91	
45-60	21	83	37	5	49	12	0.32	1.32	5	1	92	
60-85	26	93	38	9	44	10	0.27	1.17	4	0	95	
86-93	13	86	47	7	38	16	0.35	0.93	6	»	90	
93-95	37	140	53	4	27	15	0.30	0.51	3	1	96	
95-115	47	127	38	5	41	16	0.43	1.09	3	1	95	
115-140	51	141	51	0	39	6	0.11	0.71	4	2	94	
B-248												
0-13	38	34	18	9	71	7	0.37	3.92	34	7	63	
13-26	41	33	19	0	72	8	0.44	3.89	39	8	55	
26-46	37	32	20	»	74	7	0.37	3.73	40	8	53	
46-61	39	33	19	»	72	7	0.37	3.87	39	10	54	
61-72	40	34	19	6	75	3	0.17	4.20	31	7	60	
72-95	35	44	28	0	80	2	0.08	2.82	14	7	82	
95 +	33	95	33	»	62	6	0.18	1.90	7	0	91	
B-237												
0-30	55	62	41	0	30	29	0.71	0.73	25	19	55	1
30-70	49	69	26	»	36	38	1.46	1.38	11	12	77	0
70-90	31	151	72	»	13	15	0.21	0.18	10	14	77	»
90-100	16	139	56	»	16	28	0.50	0.29	9	17	74	»
100-115	20	185	71	»	13	16	0.22	0.18	9	9	82	»
115-140		461	83	»	4	13	0.16	0.05	9	12	79	»
140-150	21	68	42	»	39	19	0.19	0.93	6	10	84	»
150-185	34	138	45	»	26	29	0.64	0.58	5	5	90	»
185 +	72	173	32	»	30	38	1.12	0.94	3	25	72	»
B-236												
0-2	33	159	76	0	4	20	0.26	0.05	non dosés en totalité			
2-20	36	60	60	»	20	20	0.33	0.33	—			
20-55	21	49	56	1	22	21	0.38	0.39	—			
55-90	61	44	57	1	36	16	0.28	0.63	—			
90-140	53	54	51	1	29	19	0.37	0.57	—			
140-160									—			
B-247												
0-20	27	38	48	0	49	3	0.06	1.02	64	2	12	22
20-45	36	93	77	»	18	5	0.06	0.23	42	6	49	3
45-55	22	105	66	»	16	18	0.27	0.24	17	5	76	2
55-80	22	133	78	1	12	9	0.11	0.15	9	7	83	1
80-95	30	141	69	3	13	15	0.21	0.18	5	4	91	0
95-110		115	58	9	23	10	0.17	0.39	3	1	96	»
110-130	42	115	52	14	24	10	0.19	0.46	4	2	94	»
130-155	38	160	51	6	30	13	0.25	0.58	5	4	91	»
155-167	40	150	67	10	15	8	0.11	0.22	4	1	95	»
167-190	24	126	66	3	26	5	0.07	0.39	3	3	94	»
190-215	44	159	74	2	18	6	0.08	0.24	3	3	94	»
215 +	38	124	59	0	31	10	0.16	0.52	4	3	93	»

TABLEAU V b

Salure du sol

N°	Cs	Conc. méq g/l	Cl % An.	CO³ % An.	CO³H % An.	SO⁴ % An.	SO⁴ / Cl	CO³H / Cl	Ca % Cat.	Mg % Cat.	Na % Cat.	K % Cat.
B 246												
0-30	46	22	19	0	81	Traces	0,09	4,26	64	16	19	1
30-35	41	40	48	0	14	38	0,79	0,29	41	10	48	1
55-70	46	90	34	0	20	46	1,35	0,58	25	9	65	1
70-90	30	190	58	0	8	34	0,58	0,13	20	10	70	0
90-112	14	132	55	0	18	27	0,49	0,32	7	4	89	0
112-125	4	43	50	0	40	10	0,20	0,80	11	0	89	0
125-130	14	149	56	(0)	15	29	0,51	0,26	14	4	92	0
130-135	8	57	50	0	38	12	0,24	0,76	7	3	90	0
135-145	25	130	58	0	22	20	0,34	0,37	5	2	93	0
145-153	12	120	61	0	18	21	0,34	0,29	5	3	92	0
153-166	30	188	54	0	13	33	0,61	0,24	3	4	93	0
166-182	9	144	62	0	20	18	0,29	0,32	6	6	88	0
182-190	51	180	61	0	17	22	0,35	0,28	5	4	91	0
190-215	65	119	53	0	37	10	0,18	0,69	4	3	93	0
215 +	67	119	41	0	40	19	0,46	0,97	5	2	93	0
B 250												
0-15	41	56	43	0	34	23	0,79	0,53	47	8	44	1
15-30	32	70	45	0		30	0,55	0,66	41	7	52	0
30-40	35	102	51	0	19	30	0,37	0,58	36	7	57	0
40-55	50	82	47	0	24	29	0,51	0,61	21	1	78	0
55-80	17	64	42	3	36	19	0,85	0,45	8	1	91	0
80-110	4	49	55	4	37	4	0,67	0,07	10	2	88	0
110-115	0	166	65	1	14	19	0,21	0,29	5	3	92	0
115-120	12	127	60	2	18	20	0,30	0,33	5	3	92	0
120-140		86	44	4	29	23	0,65	0,52	5	1	94	0
140-145	16	103	55	6	22	17	0,40	0,30	4	1	95	0
145-160	56	114	48	3	33	16	0,68	0,33	4	1	95	0
160-180	70	105	38	4	50	8	1,31	0,21	5	1	94	0
180 +	53	96	32	12	48	8	1,50	0,25	6	0	94	0
EAU A 218			94	2	2	2	0,02	0,02	57	17	26	0
B 232												
0-2	28	126	59	0	41	20	0,33	0,35	23	1	75	1
2-15	34	139	59	0	18	23	0,38	0,30	21	1	77	1
15-35	35	115	50	0	21	29	0,58	0,42	5	2	92	1
35-70	42	130										
70-120	36	124										
120-130	21	113	40	1	31	28	0,70	0,77	3	0	97	0
B 230												
0-10	35	39	21		68	11	0,52	3,23	20	42	35	3
10-30	32	40	26		63	11	0,42	2,42	26	48	23	3
30-40	26	35	23		64	13	13	2,78	41	33	24	2
40-55	31	46	18		59	23	1,27	3,27	23	57	18	2
55-85	29	41	26		55	19	0,73	2,11	31	44	24	1
85-120	27	55	23		45	32	1,39	1,95	14	61	24	1
120-150	39	59	27		52	21	0,77	1,92	0	29	71	0
B 229												
0-25	65	65	52		36	12	0,23	0,69	34	32	33	1
25-50	63	64	53			11	0,20	0,67	25	19	55	1
50-75	27	86	48		26	26	0,54	0,54	12	33	49	0
75-100	60	85	49		34	17	0,34	0,69	3	16	81	0
100-105	28	103	56		30	14	0,25	0,53	0	16	84	0
105-115	30	94	48		37	15	0,31	0,77	0	12	88	0
115 +	52	106	44		46	10	0,22	1,04	0	4	96	0

TABLEAU V c

Salure du sol

N°	CS	Conc. méq g/l	ANIONS Cl % An.	CO_3 % An.	CO_3H % An.	SO_4 % An.	SO_4/Cl	CO_3H/Cl	CATIONS Ca % Cat.	Mg % Cat.	Na % Cat.	K % Cat.
B-228												
0-10	69	69	43	0	34	23	0.53	0.79	14	38	45	3
10-20	78	60	50	0	35	15	0.30	0.70	12	32	55	1
20-30	79	60	42	0	43	15	0.36	1.02	8	26	65	1
30-80	66	81	42	0	36	22	0.52	0.86	3	19	78	0
80-120	46	108	31	4	38	27	0.87	1.23	0	14	86	0
B-227												
0-20	40	55	23	0	37	40	1.74	1.61	13	60	26	1
20-40	36	51	17	0	40	43	2.53	2.35	10	69	19	2
40-60	43	88	21	0	39	40	1.90	1.86	22	52	24	2
60-110	31	85	39	5	26	30	0.70	0.67	0	37	62	1
60-110	31	98	46	0	27	27	0.59	0.59	0	36	64	0
110-120	21	89	51	4	30	15	0.29	0.59	0	27	72	1
B-245												
0-20		37	34	0	59	7	0.20	1.73	20	7	73	0
20-40	45	44	44	0	49	7	0.15	1.11	20	6	74	0
40-60	45	47	46	0	49	5	0.10	1.06	18	7	75	0
60-75	40	75	58	0	32	10	0.17	0.55	11	7	82	0
75-95	37	115	63	0	24	13	0.20	0.38	5	7	88	0
95-120	26	95	67	0	24	9	0.13	0.35	9	11	80	0
120-145	20	50	51	0	44	5	0.09	0.86	15	10	75	0
145 +	—	45	67	0	33	T	—	0.49	17	12	71	0
B-226												
0-20	48	45	33	0	47	20	0.60	1.41	0	28	71	1
20-40	45	91	53	0	26	21	0.40	0.49	5	25	69	1
40-60	49	405	84	0	4	12	0.14	0.05	18	24	58	0
60-70	48	226	73	0	8	19	0.26	0.11	11	16	73	0
70-80	46	160	64	0	17	19	0.30	0.27	5	9	86	0
80-100	43											
B-235												
0-20	50	90	61	0	18	21	0.34	0.30	38	13	48	1
20-45	47	125	44	0	15	41	0.93	0.34	28	5	66	1
45-65	34	105	39	1	26	34	0.87	0.67	7	10	83	0
65-90	82	81	38	0	35	27	0.71	0.92	9	14	76	1
90-100	14	105	47	0	25	28	0.60	0.53	12	18	69	1
100-115	22	149	47	1	20	32	0.68	0.43	5	3	92	0
115-125	9	66	37	0	40	23	0.62	1.08	5	19	76	0
125-140	20	109	30	1	35	34	1.13	1.17	3	19	78	0
140-150	31	137	34	1	36	29	0.85	1.06	4	11	85	0
150-170	20	131	37	8	24	31	0.84	0.65	5	5	90	0
B-233												
0-20	28	94	48	1	31	20	0.42	0.65	41	22	35	2
20-60	9	109	41	2	29	28	0.68	0.71	36	32	31	1
60-85	19	56	29	2	33	36	1.24	1.14	22	53	23	2
85-110	7	38	32	2	43	23	0.72	1.34	15	43	41	1
110-140	18	81	51	1	30	18	0.35	0.59	5	13	81	1
140-170	42	107	57	1	23	19	0.33	0.40	5	1	93	1
170-210	8	91	53	0	22	25	0.47	0.42	9	19	71	1
210 +		108	50	0	23	27	0.54	0.46	5	5	89	1

TABLEAU V d

Salure du sol

N°	Cs	Conc. méq. g/l	ANIONS Cl % An.	CO³ % An.	CO³ H % An.	SO⁴ % An.	SO⁴/Cl	CO³ H/Cl	CATIONS Ca % Cat.	Mg % Cat.	Na % Cat.	K % Cat.
B-231												
0-10	38	63	58	0	22	20	0.34	0.38	41	18	40	1
10-35	36	72	46	0	23	31	0.67	0.50	42	25	32	1
35-55	34	98	59	0	17	24	0.41	0.29	25	15	59	1
55-65	35	184	66	0	15	21	0.32	0.23	22	7	70	1
65-80	12	135	52	0	12	36	0.69	0.23	12	8	79	1
80-100	26	135	45	0	12	43	0.96	0.27	9	13	78	0
100-140	42	179	46	0	13	41	0.89	0.28	7	2	91	0
140-160	23	174	57	0	13	30	0.53	0.23	6	4	89	1
B-234												
0-25	47	95	57	0	18	25	0.43	0.32	36	13	50	1
25-65	42	58	51	0	29	20	0.39	0.57	52	21	25	2
65-85	38	125	56	1	16	27	0.48	0.29	12	6	81	1
85-135	34	92	41	4	26	29	0.71	0.63	5	7	88	0
135-145	29	86	36	10	31	23	0.64	0.86	6	7	87	0
145-200	29	93	38	9	29	24	0.63	0.76	5	7	88	0
B-249												
0-8	24	65	64	0	32	4	0.06	0.50	55	7	23	15
8-15	19	73	56	0	27	17	0.30	0.48	52	7	28	13
15-30	22	93	51	0	21	28	0.54	0.41	42	8	44	6
30-45	23	106	55	0	27	18	0.32	0.49	31	12	53	4
45-58	16	102	54	2	24	20	0.37	0.44	13	7	77	3
58-70	14	117	56	2	23	19	0.33	0.41	11	4	82	3
70-85	16	121	54	2	20	23	0.42	0.37	5	7	85	3
85-110	12	121	56	2	20	22	0.39	0.31	5	6	87	2
110-130	21	121	51	0	26	23	0.45	0.50	5	6	87	2
130-135	18	54	46	7	40	7	0.15	0.86	12	3	83	2
135 +	18	72	38	2	38	22	0.57	1.00	8	5	86	1
B-244												
0-15	28	75	61	0	19	20	0.32	0.31	33	11	55	1
15-25	37	49	47	0	35	18	0.38	0.74	29	7	63	1
25-55	26	70	60	0	23	17	0.28	0.38	19	7	74	0
55-60	23	104	64	0	14	22	0.34	0.21	20	7	73	0
60-85	11	128	71	0	9	20	0.28	0.12	15	8	77	0
85-112	35	150	66	0	13	21	0.31	0.19	6	6	88	0
112-140	44	162	63	0	16	21	0.33	0.25	5	5	90	0

ACHEVÉ D'IMPRIMER SUR LES PRESSES
DES « ÉDITIONS MAROCAINES ET INTERNATIONALES »,
11, AVENUE DE RABAT A TANGER
LE 25 SEPTEMBRE 1961

المملكة المغربية

وزارة الفلاحة

انجازات البحث الزراعى

12

مديرية البحث الزراعي والتعليم الفلاحي
99 - شارع تمارة
الرباط 1961